

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

**Kombinovaný pásový a kolový podvozek pro
servisní robot**

*Hybrid Track-Wheel Undercarriage for Service
Robot*

Student:

Bc. Jaroslav Pavelka

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Skařupa, CSc.

Ostrava 2011

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5. 2011

.....

Bc. Jaroslav Pavelka

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5. 2011

.....

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jaroslav Pavelka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bezručova 427/34
741 01, Nový Jičín

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAVELKA, J. *Kombinovaný pásový a kolový podvozek pro servisní robot : diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2011, 69 s. Vedoucí práce: Skařupa, J.

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh podvozku servisního robotu, jenž bude kombinovat dva druhy lokomočních ústrojí - kolové a pásové. Motivem takového sdružení je sloučení výhod obou lokomočních ústrojí.

Na základě analýzy robotů, jež kombinují kolová a pásová lokomoční ústrojí, je sestavena morfologická matice. Pomocí tohoto nástroje jsou navrženy tři možné varianty řešení. S využitím hodnotové analýzy je pak vybrána optimální varianta, která je dále konstrukčně rozpracována. Součástí konstrukčního návrhu je 3D model hybridního podvozku v systému Pro/Engineer, sestavný výkres a potřebné kontrolní výpočty.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PAVELKA, J. *Hybrid Track-Wheel Undercarriage for Service Robot : Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2011, 69 p. Thesis head: Skařupa, J.

Intention of master thesis is engineering design of undercarriage for service robot that combines two types of locomotion mechanisms - wheeled and tracked. Motive of this combination is integrating advantages of both locomotion mechanisms.

On the basis of robots analyses that combines wheeled and tracked locomotion mechanisms is tabulate morphologic matrix. By the help of this instrument are designed three possible variants. By the help of value analysis is chosen optimal variant, which is elaborated. Part of engineering design is 3D model of hybrid undercarriage in system Pro/Engineer, assembly drawing and necessary check calculations.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Jiřímu Skařupovi, CSc. za odborné konzultace při zpracování diplomové práce.

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení.....	8
Použité zkratky	11
1 Úvod	12
2 Analýza problematiky hybridních podvozků.....	13
2.1 Charakteristika kolových a pásových podvozků	13
2.2 Přehled současných hybridních robotů	13
2.2.1 Mobit.....	13
2.2.2 TeleMAX.....	14
2.2.3 Andros F6A.....	15
2.2.4 Cyclops Mk4D	16
2.2.5 Guardian.....	17
2.2.6 MK3 Caliber Robot	18
2.2.7 Malá robotizovaná jednotka pro průzkum	18
2.2.8 VIPeR.....	19
2.2.9 Záchranářský robot NASA	20
3 Výchozí situace pro návrh hybridního podvozku	21
3.1 Scénář aplikací hybridního podvozku.....	21
3.2 Požadavkový list.....	22
4 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty	26
4.1 Morfologická matice.....	26
4.2 Varianty řešení	28
4.2.1 Varianta A.....	28
4.2.2 Varianta B	29
4.2.3 Varianta C	30

4.3 Výběr optimální varianty	32
4.3.1 Kritéria rozhodování	32
4.3.2 Bodové hodnocení pro jednotlivá kritéria	33
4.3.3 Zhodnocení kritérií pro jednotlivé varianty	33
4.3.4 Stanovení významnosti kritérií	34
4.3.5 Stanovení váhy významnosti a váženého indexu kritéria	34
4.3.6 Výpočty celkových indexů variant	35
4.3.7 Zhodnocení variant	37
5 Rozbor hybridního podvozku	38
6 Popis konstrukce hybridního podvozku	42
6.1 Konstrukce rámu	42
6.2 Konstrukce výkyvného ramene	43
6.2.1 Výkyvná část	44
6.2.2 Napínaná část ramene	45
6.2.3 Systém napínání	46
6.3 Konstrukce pojezdového ústrojí	47
6.3.1 Hnací řemenice	48
6.3.2 Hnaná řemenice	49
6.3.3 Vodicí kola	51
7 Kontrolní výpočty	52
7.1 Návrh hnacího pohonu pojezdového kola	52
7.2 Návrh hnacího pohonu pásu	55
7.3 Návrh pohonu výkyvného ramena	58
8 Závěr	62
9 Seznam použité literatury	65
10 Seznam příloh	68

Seznam použitého značení

Značka	Popis	Jednotka
a_K	zrychlení podvozku (kola)	$[\text{m.s}^{-2}]$
a_P	zrychlení podvozku (pásky)	$[\text{m.s}^{-2}]$
a_R	tečné zrychlení výkyvného ramena (v těžišti)	$[\text{m.s}^{-2}]$
b_p	průchodná šířka	$[\text{mm}]$
F_C	sílu k rozjezdu podvozku čtyřmi pásky	$[\text{N}]$
F_{C4}	síla pro rozjezd na jednom pásku	$[\text{N}]$
F_f	valivý odpor vozovky	$[\text{N}]$
F_N	normálová reakce vozovky	$[\text{N}]$
F_{OS}	odpor stoupání	$[\text{N}]$
F_{Pa}	setrvačná síla podvozku	$[\text{N}]$
F_R	síla pro otočení ramena	$[\text{N}]$
F_{Ra}	síla pro otočení výkyvného ramena	$[\text{N}]$
G_C	gravitační síla působící na podvozek	$[\text{N}]$
G_N	gravitační síla od nosnosti podvozku	$[\text{N}]$
G_{NA}	gravitační síla od nosnosti podvozku rozložená na dvě ramena	$[\text{N}]$
G_R	gravitační síla působící na výkyvné rameno	$[\text{N}]$
G_{RA}	gravitační síla působící na rám	$[\text{N}]$
G_{RA2}	gravitační síla působící na rám rozložená na dvě ramena	$[\text{N}]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
h_i	bodové hodnocení i - tého kritéria	$[-]$
I_i	vážený index i - tého kritéria	$[-]$
I_{MK}	moment setrvačnosti malého vodícího kola	$[\text{kg.m}^2]$
I_{MR}	moment setrvačnosti hnací řemenice	$[\text{kg.m}^2]$
I_{VK}	moment setrvačnosti velkého vodícího kola	$[\text{kg.m}^2]$

I_{VR}	moment setrvačnosti hnané řemenice	[kg.m ²]
i_{KS}	převod kuželového soukolí	[-]
i_{SS}	převod šnekového soukolí	[-]
i_P	převodový poměr řemenového převodu (pásu)	[-]
i_{PR}	převodový poměr převodovky	[-]
k_b	koeficient bezpečnosti	[-]
M_C	celkový požadovaný krouticí moment na výstupu pohonu	[Nm]
M_{HR}	krouticí moment hnací řemenice	[Nm]
M_K	hnací moment pojezdového kola	[Nm]
M_M	krouticí moment motoru	[Nm]
M_P	krouticí moment pro pás	[Nm]
M_R	krouticí moment pro výkyvné rameno	[Nm]
M_{RH}	odpor rotujících hmot	[Nm]
M_{MAX}	maximální krouticí moment na výstupu z převodovky	[Nm]
m_C	hmotnost podvozku i s předpokládanou nosností	[kg]
m_M	hmotnost motoru	[kg]
m_N	nosnost podvozku	[kg]
m_P	hmotnost podvozku	[kg]
m_{PR}	hmotnost převodovky	[kg]
m_R	hmotnost výkyvného ramena	[kg]
m_{RA}	hmotnost rámu	[kg]
n_C	celkové požadované otáčky na výstupu pohonu	[min ⁻¹]
n_{HR}	otáčky hnací řemenice	[min ⁻¹]
n_K	otáčky pojezdového kola	[min ⁻¹]
n_M	otáčky motoru	[min ⁻¹]
n_{VR}	otáčky výkyvného ramena	[min ⁻¹]
o_{MR}	kruhový oblouk hnací (malé) řemenice	[m]

o_{VR}	kruhový oblouk hnané (velké) řemenice	[m]
P_M	výkon motoru	[W]
q_i	váha významnosti i - tého kritéria	[-]
r_K	poloměr pojezdového kola	[m]
r_{MK}	poloměr malého vodícího kola	[m]
r_{MR}	poloměr hnací (malé) řemenice	[m]
r_T	vzdálenost těžiště výkyvného ramena od osy otáčení	[m]
r_{VK}	poloměr velkého vodícího kola	[m]
r_{VR}	poloměr hnané (velké) řemenice	[m]
s	počet poháněných kol	[-]
s_K	počet kol	[-]
v_i	počet voleb i - tého kritéria	[-]
v_K	rychlost podvozku (kola)	[m.s ⁻¹]
v_P	rychlost podvozku (pásky)	[m.s ⁻¹]
η_{PR}	účinnost převodovky	[%]
θ	součinitel vlivu rotačních částí	[-]
μ_K	koeficient valivého odporu (kola)	[-]
μ_P	Koeficient valivého odporu (pásky)	[-]
η_{SS}	účinnost šnekového převodu	[-]
φ_K	úhel stoupání nakloněné roviny (kola)	[°]
φ_P	úhel stoupání nakloněné roviny (pásky)	[°]
ω_K	úhlová rychlost pojezdového kola	[s ⁻¹]
ω_{MR}	úhlová rychlost hnací řemenice	[s ⁻¹]
ω_R	úhlová rychlost výkyvného ramena	[s ⁻¹]

Použité zkratky

Zkratka	Popis
SR	servisní roboty
LÚ	lokomoční ústrojí
KP	kolové podvozky
PP	pásové podvozky
OM	objekt manipulace

1 Úvod

V současné době můžeme pozorovat velmi rychlý rozvoj servisní robotiky. Množství úloh a oblastí nasazení, v nichž servisní roboty (SR) nacházejí uplatnění, je nespočet. Výjimkou není ani armáda. Zde nacházejí uplatnění především tzv. EOD roboty. Zkratka EOD pochází z anglického spojení slov "explosive ordnance disposal", což lze volně přeložit jako "roboty pro nakládání s výzbrojí a výbušninami". Samotný název již napovídá o možném uplatnění těchto strojů.

EOD roboty využívají zejména dvou skupin podvozků. Podvozky s kolovým lokomočním ústrojím (LÚ) a podvozky s pásovým LÚ. Z použití dané skupiny podvozků vyplívají různé výhody a nevýhody. Třetí skupinou jsou podvozky, které kombinují obě LÚ. Tím je dosaženo skloubení výhod a eliminace nevýhod daných LÚ.

Cílem diplomové práce je navrhnout konstrukci podvozku, která bude kombinovat obě LÚ. Požadavkem pak je, aby daný podvozek byl schopen cíleně přepínat mezi kolovým módem a pásovým módem. Tímto opatřením se dosáhne možnosti měnit druh LÚ podle aktuální situace z hlediska druhu terénu a typu překážky. Dále se pak také zvýší mobilita a schopnost se pohybovat v různých typech prostředí.

2 Analýza problematiky hybridních podvozků

2.1 Charakteristika kolových a pásových podvozků

Výhodou kolových podvozků (KP) je velmi dobrá mobilita po zpevněném terénu - chodníky, cesty, podlahy. Mobilita se vyznačuje zejména vysokou jízdní rychlostí a tichým klidným chodem bez větších vibrací. Druhá vlastnost pak zaručuje zvýšení životnosti některých součástí. Oproti pásovým podvozkům (PP) mají KP nižší energetickou náročnost. Tím je dosaženo většího akčního rádiu (dojezdová vzdálenost) při použití stejně nabitých baterií. Mezi nevýhody patří snížená schopnost zvládat svahy.

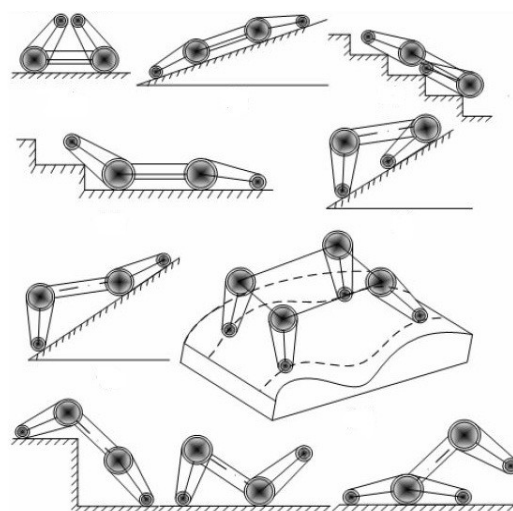
Výhodou PP je dobrá mobilita po nezpevněném terénu - bahno, tráva, sutiny. To je způsobeno velkou plochou pásů, která je v kontaktu s terénem. Díky pásům je také podvozek schopen zvládat vyšší překážky - nízké zdi, obrubníky. Některé konstrukce zvládnou i vyjíždět a sjíždět schody. Nevýhodou PP je nízká rychlost a obtížné stanovení přesné polohy robotu (z důvodu protáčení pásů).

2.2 Přehled současných hybridních robotů

2.2.1 Mobit

Jedná se o univerzitní robot kombinující kola, nohy a pásy (obr. 1). Využíváním různých lokomočních módů (obr. 2) je zaručena schopnost se pohybovat v různých prostředích a vysoká přizpůsobitelnost vůči překážkám. [9]

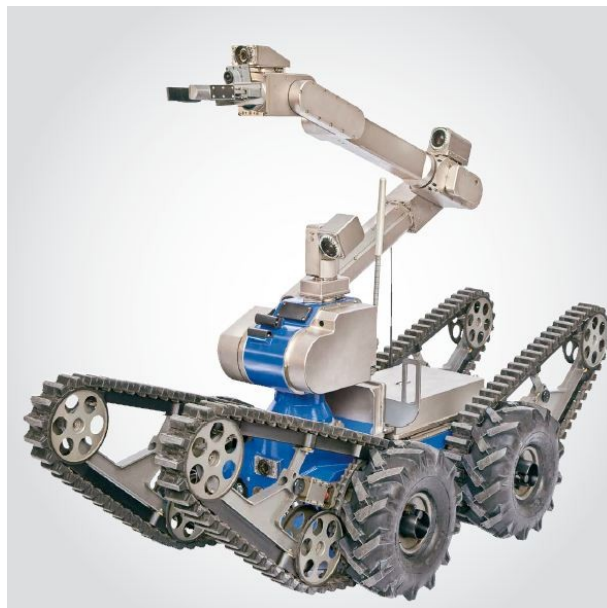
Robot se skládá z rámu a čtyř výkyvných ramen. Typ používaného LÚ závisí na poloze výkyvných ramen. Pokud se ramena nacházejí v horní poloze, zabírají kola a robot je v kolovém módu. Pokud jsou ramena ve svislé poloze, zabírají pásy a robot je v pásovém módu. V případě ramen v dolní poloze se jedná se kráčejší mód.

Obr. 1 *Mobit*Obr. 2 *Lokomoční módy robotu*

2.2.2 TeleMAX

Robot určený pro zneškodňování výbušnin nebo jiné operace kdy hrozí člověku nebezpečí (obr. 3). Uplatňuje se především tam, kde jsou stísněné prostory (letadla, autobusy, metra a ostatní veřejná doprava). Jeho rozměry ve stažené pozici jsou 800 x 400 x 750 mm (d x š x v). Hmotnost se pohybuje kolem 74 kg. [10]

Robot se primárně pohybuje po dvou párech pásů. Každý pás má vlastní pohon. Součástí příslušenství robotu jsou 4 rychle připevnitelná vzduchem plněná kola. Robot je schopen překonávat svahy do úhlu 45° a překážky do výšky 500 mm. Dosahuje rychlosti až 4 km/h při využití pásů a 10 km/h při využití kol.

Obr. 3 *TeleMAX*

2.2.3 Andros F6A

Jedná se o robot, který byl konstruován výhradně pro armádní účely (obr. 4). Jeho hlavními rysy jsou velká odolnost a robustnost. Robot je určen pro širokou škálu aplikací a to vždy v závislosti na zvolených subsystémech. Jeho rozměry jsou 1350 x 725 x 1412,5 mm (d x š x v). Šířka bez kol je 437,5 mm. Hmotnost se pohybuje kolem 220 kg. [11]

Robot se primárně pohybuje po dvou párech pásů. Každý pás má vlastní pohon. Součástí příslušenství robotu jsou 4 rychle připevnitelná vzduchem plněná kola. Robot zvládá překonávat svahy (do úhlu 45°), kanály (do šířky 525 mm), překážky (do výšky 450 mm) a tvrdý terén. Při jízdě po kolech dosahuje rychlosti 12,6 km/h.

Obr. 4 *Andros F6A*

2.2.4 Cyclops Mk4D

Robot určený pro zneškodňování výbušnin nebo jiné operace kdy hrozí člověku nebezpečí (obr. 5). Díky svým rozměrům je vhodný pro použití v městském prostředí a místech se stísněnými prostory (letadla, autobusy, lodě, metra, zavazadlové prostory). Jeho rozměry jsou 870 x 535 x 400 mm (d x š x v). Šířka bez kol je 395 mm. Hmotnost bez nákladu a dalších subsystémů je 34 kg. [15]

Robot se pohybuje po dvou párech pásů. Součástí příslušenství robotu jsou 4 rychle připevnitelná vzduchem plněná kola. Robot je schopen překonávat svahy do úhlu 45°, překážky do výšky 400 mm a příkopy o délce 500 mm. V případě zdolávání schodů nelze použít kola. Dosahuje rychlosti až 5 km/h při využití pásů a 8 km/h při využití kol.

Obr. 5 *Cyclop Mk4D*

2.2.5 Guardian

Robot určený pro zneškodňování výbušnin nebo jiné operace kdy hrozí člověku nebezpečí (obr. 6). Jeho rozměry jsou 758 x 535 x 758 mm (d x š x v). Šířka bez kol je 415 mm. Hmotnost bez nákladu a dalších subsystémů je 63 kg. [16]

Robot se pohybuje po dvou párech pásů. Součástí příslušenství robotu jsou 4 rychle připevnitelná vzduchem plněná kola. Robot je schopen překonávat svahy do úhlu 45°, a překážky do výšky 400 m. Dosahuje rychlosti až 5 km/h při využití pásů a 9 km/h při využití kol.

Obr. 6 *Guardian*

2.2.6 MK3 Caliber Robot

Robot určený pro manipulaci a zneškodňování výbušnin (obr. 7). Jeho rozměry jsou 840 x 620 x 560 mm (d x š x v). Hmotnost je 88 kg. [12]

Robot se pohybuje po vzduchem plněných kolech (průměr kol je 250 mm). Všechna kola jsou poháněna. Podle potřeby (druhu terénu) lze na kola nasadit pásy. Nevýhodou tohoto řešení je potřeba rozhodnout, které z LÚ bude pro danou servisní úlohu vhodnější a nemožnost během zásahu tento stav změnit. Dosahuje rychlosti až 3,2 km/h při nízkém výkonu a 8 km/h při vysokém výkonu.



Obr. 7 MK3 Caliber Robot

2.2.7 Malá robotizovaná jednotka pro průzkum

Robot (obr. 8) je určen pro rychlý průzkum bojiště a míst těžko přístupných, tj. podvozky aut, prostory pod sedadly dopravních prostředků, úzké chodby nebo ventilační potrubí. Dalším možným využitím je inspekce ventilačního potrubí a inspekce prostorů zamořených chemickým nebo biologickým znečištěním. Zvládá manipulovat s OM do hmotnosti 2 kg při maximálním vyložení ramena. [13]

Robot k pohybu využívá kombinaci pásů a kol. Dle potřeby je možno kola demontovat. Robot zvládá nerovnosti a překážky do úhlu 45 [°]. Dosahuje rychlosti až 10 km/h.

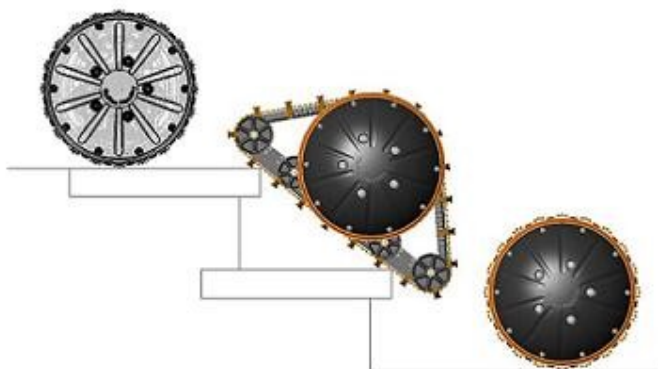


Obr. 8 Malá robotizovaná jednotka pro průzkum

2.2.8 VIPeR

Slovo VIPeR je zkratka slov "verstaile intelligent portable robot", což se dá volně přeložit jako "proměnlivý inteligentní přenosný robot" (obr. 9). Jedná se o malý, lehký, jedním člověkem přenositelný stroj schopný překonávat schody a překážky. Jeho účelem je především prvotní průzkum bojiště či zamořeného prostředí. Nevýhodou tohoto robotu je nízká nosnost, proto se z hlediska různých přídatných subsystému omezuje pouze na senzory a snímací techniku. [14]

Robot se pohybuje po dvou kolech. Vysunutím dvou ramen se hlavní kola přemění na pásy.

Obr. 9 *VIPeR*Obr. 10 *Překonávání schodů*

2.2.9 Záchranářský robot NASA

Hybridní robot vyvíjený společností NASA (obr. 11).

Obr. 11 *Robot NASA*

3 Výchozí situace pro návrh hybridního podvozku

3.1 Scénář aplikací hybridního podvozku

Hybridní podvozek bude sloužit jako mobilní platforma EOD robotu

Prostředí nasazení:

- **Běžné vnitřní prostředí (indoor)** - budovy, haly, místnosti a chodby budov, schodiště, výtahy
- **Běžné venkovní prostředí (outdoor)** - zastavěné městské části, prostředky městské hromadné dopravy

Vytipované servisní úlohy EOD robotu:

- **Manipulační** - odebrání pevných, kapalných a plyných vzorků a následné ukládání do případných zásobníků, transport nebezpečného materiálu, manipulace s trhavinami, manipulace se zbraňovými systémy, vyprošťování předmětů
- **Technologické** - zneškodňování a odstraňování výbušnin, přestřihávání kabelů, používání vrtací soupravy, rozbíjení skla,
- **Netechnologické** - monitorování při zásahových akcích, monitorování v nebezpečném prostředí, sběr informací a dat

3.2 Požadavkový list

- **průjezdná šířka podvozku:** 500 mm
- **překážky:** překážky s výškovým přesazením do 210 mm, svahy do úhlu 45°, schodiště
- **rychlost:** 4 km/h (pásky), 8 km/h (kola)
- **hmotnost:** 70 kg (bez ostatních subsystemů)
- **nosnost:** 20 kg (subsystemy spolu s případným OM)
- použití elektropohonů
- napájení akumulátory
- ovládání na dálku operátorem
- odolnost proti vlhku a prachu

Průjezdná šířka podvozku

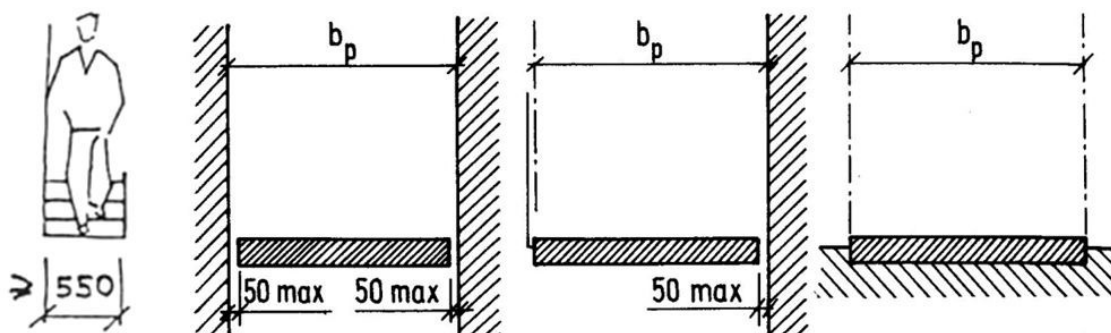
Hodnota průjezdné šířky podvozku vychází ze dvou typů situací, se kterými se může EOD robot setkat.

První ze situací je průjezd EOD robotu zárubněmi dveří. Zárubně všech typových řad i rozměrů jsou vyráběny dle ČSN 74 6501. Nejnižší průchodná šířka zárubní je 600 mm (obr. 12). Z toho vyplývá, že EOD robot s průjezdnou šířkou podvozku 500 mm je schopen takovýmito zárubněmi projet.



Obr. 12 Průchodná šířka zárubní dveří

Druhou situací je jízda EOD robotu po schodech či schodištích. Rozměry schodiště se řídí normou ČSN 73 4130. Tato norma určuje minimální průchodnou šířku ramene schodiště, což je vodorovná vzdálenost mezi stavebními konstrukcemi omezující průchod ramene. Průchodná šířka ramene b_p má být násobkem 600 mm, což je šířka potřebná pro průchod jednoho dospělého člověka (ve výjimečných případech 550 mm) (obr. 13). EOD robot s průjezdnou šířkou podvozku 500 mm je schopen se takového schodiště projet.



Obr. 13 Průchodná šířka schodiště

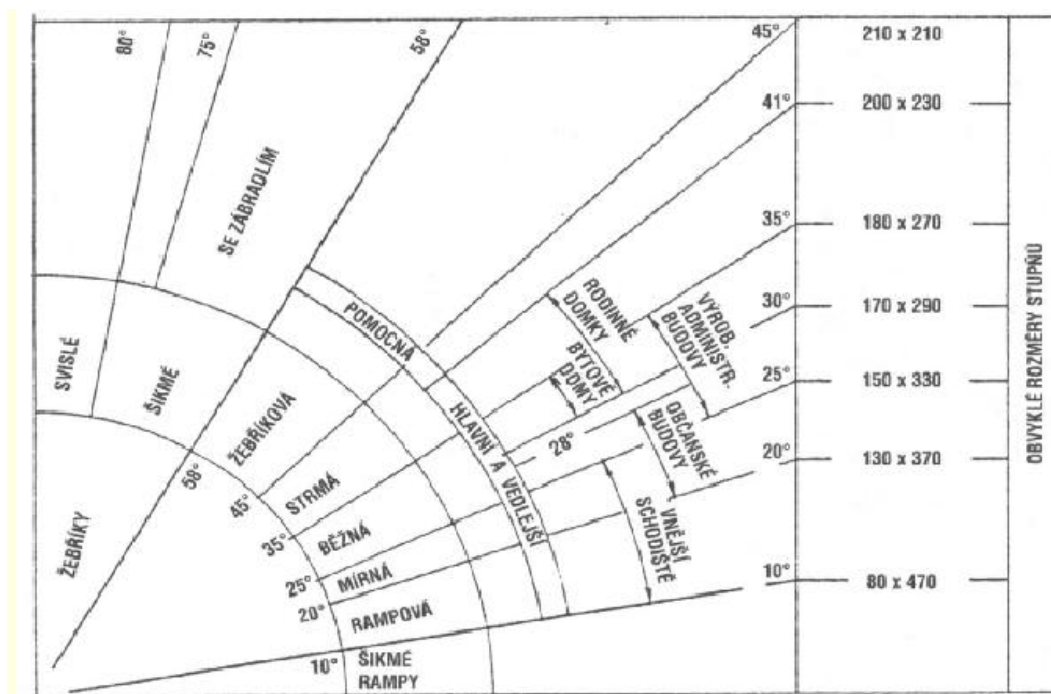
Překážky

Schopnost překonávat překážky souvisí především s požadavkem na zdolávání schodišť. Rozměry schodiště se řídí normou ČSN 73 4130. Tato norma určuje maximální povolené rozměry schodišťového stupně (schodu).

Schodišťový stupeň je konstrukční prvek překonávající výšku a šířku jedním normálním krokem. Každé schodišťové rameno se skládá ze stupňů. Stupnice je pak vodorovná část stupně.

Typ schodiště	Sklon ramen	Výška stupně
Rampová	10 - 20 [°]	80 - 120 [mm]
Mírná	20 - 30 [°]	130 - 150 [mm]
Běžná	25 - 35 [°]	150 - 180 [mm]
Strmá	35 - 45 [°]	180 - 210 [mm]

Tab. 1 Rozdělení schodů dle sklonu ramen

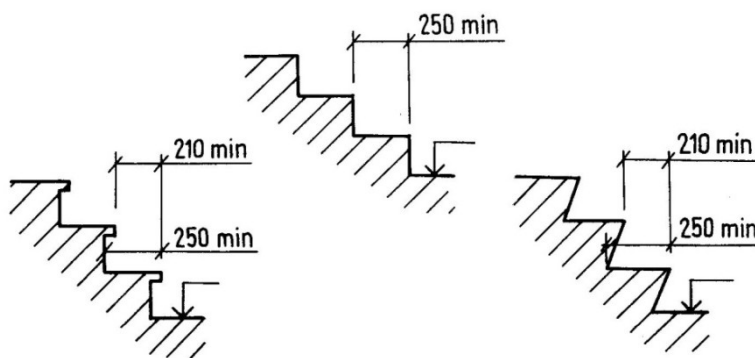


Obr. 14 Diagram rozdělení schodů dle sklonu ramen

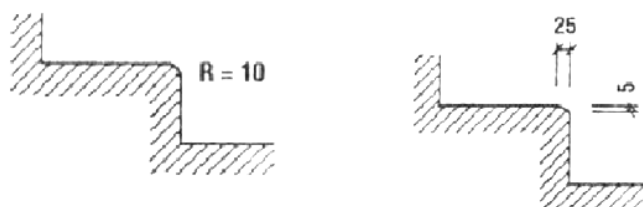
Při požadavku, že by EOD robot měl zvládat i strmé schody, je maximální výška schodišťového stupně 210 mm a úhel sklonu ramene 45° (tav. 1, obr. 14). Z těchto hodnot pak vychází maximální výška překonávané překážky i maximální úhel zdolávaného svahu.

Nejmenší dovolená šířka schodišťového stupně na výstupní čáře je 210 mm. Minimální dovolená šířka stupnice je 250 mm (br. 15). Vztah mezi výškou h a šířkou b schodišťového stupně vyjadřuje Lehmanův vzorec (vztah 3.1). Největší dovolený poloměr zaoblení je 10 mm (obr. 16). Největší dovolený rozměr okosení je 25 x 5 mm.

$$2 \cdot h + b = 630 \text{ mm} \quad (3.1)$$



Obr. 15 Nejmenší dovolená šířka schodišťového stupně



Obr. 16 Největší dovolený poloměr zaoblení a rozměr okosení

Rychlost

Požadované rychlosti vychází z parametrů již existujících konstrukcí EOD robotů. Snahou je se těmito parametry přiblížit.

Hmotnost

Požadovaná minimální hmotnost je postavena na základě hmotností již existujících EOD robotů podobného typu v rámci konkurenceschopnosti. Minimální hmotnost také zaručuje snadnou manipulovatelnost a menší nároky na přepravu.

Jediným omezujícím faktorem může být využívání výtahů uvnitř budov. Hmotnost podvozku, nástavby a případného přepravovaného OM nesmí překročit nosnost výtahu. Minimální nosnost výtahů (jedná se pouze o výtahy starší výroby) je 250 kg. V závislosti na půdorysných rozměrech výtahových kabin je třeba zohlednit i rozměry podvozku EOD robotu. Nejmenší půdorysné rozměry kabin (jedná se opět o výtahy starší výroby) jsou 800 x 900 mm. Půdorysné rozměry a nosnosti současně instalovaných výtahů jsou vyšší.

Nosnost

Vychází z hmotnosti nástavby spolu s dalšími subsystemy (manipulační, technologický, řídicí, senzorický, snímací) včetně vlastního zdroje energie.

4 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty

4.1 Morfologická matice

Pro návrh variant řešení byla použita morfologická matice. Na základě provedené analýzy již existujících robotů byly vybrány nejdůležitější funkce, které by měl podvozek splňovat. Ke každé funkci pak byla stanovena možná řešení jejich technické realizace (tab. 2). Vzájemným kombinováním jednotlivých realizací u každé funkce získáme velké množství teoreticky možných variant řešení (permutace počtu technických realizací pro každou funkci). Z nich se postupnou selekcí vyloučí nejdříve technicky protichůdná řešení (fyzikálně nerealizovatelné) a dále pak řešení, jež jsou neekonomické či jsou na nízké technické úrovni. [1]

Číslo znaku	Charakteristická vlastnost	Technická realizace			Počet prvků
1	počet pásů	4	6	-	2
2	počet stop	2	4	-	2
3	počet výkyvných ramen	2	4	-	2
4	počet hnacích kol	2	4	-	2
5	umístění hnacího kola	v ose kloubu výkyvného ramena	mimo osu kloubu výkyvného ramena	-	2
6	umístění pojezdového kola	na hnacím kole pásu	na hnaném kole pásu	mimo hnací i hnané kolo	3
7	umístění pohonu výkyvného ramena	na rámu	na výkyvném ramenu	-	2
8	umístění pohonu hnacího kola	na rámu	na výkyvném ramenu	-	2
9	přenos hnacího momentu na pás	záběr hnacího kola do spojů pásů (princip řetězu)	záběr hnacího kola do otvorů pásu	záběr hnacího kola do ozubení pásu (princip ozubeného řemenu)	3
10	vodící prvky pásu	žádné	vodící kola	vodící lišta	3
11	dopínání pásu	hnacím kolem	hnaným kolem	vodícími prvky	3

→ Varianta A

→ Varianta B

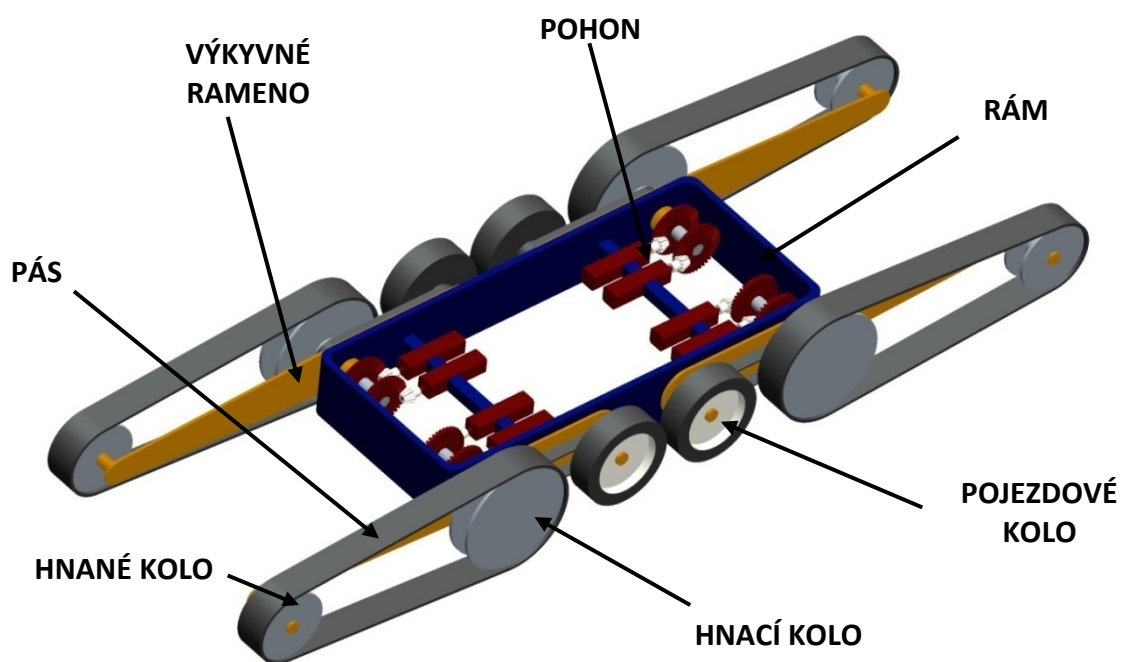
→ Varianta C

Tab. 2 Morfologická matice a 3 variantní řešení

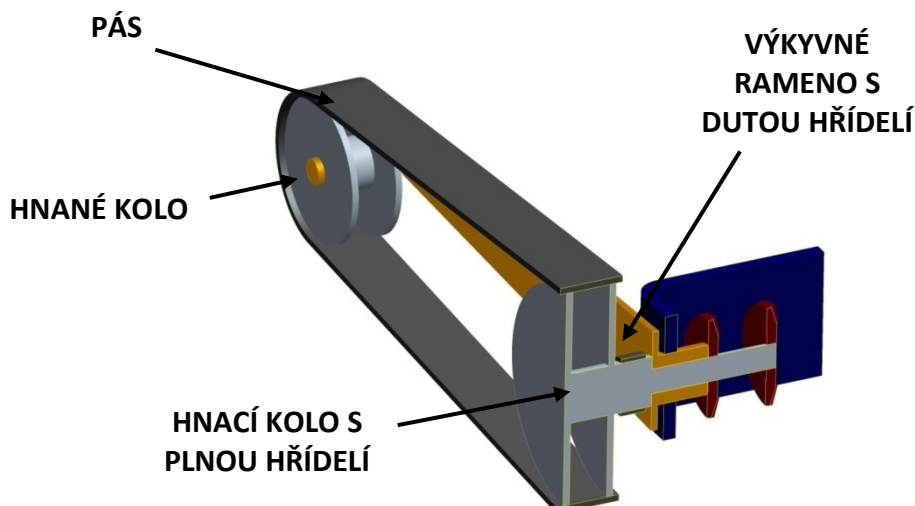
4.2 Varianty řešení

4.2.1 Varianta A

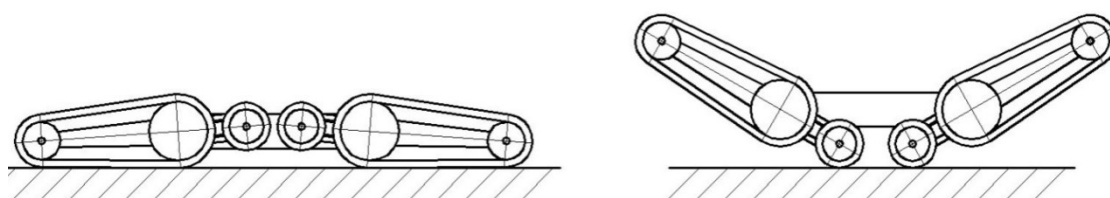
Variantou A (obr. 17) je čtyřpásový dvoustopý podvozek. Podvozek se skládá z rámu a čtyř výkyvných ramen. Výkyvné rameno je s rámem spojeno jako rotační pohybová jednotka, jenž umožňuje jeho naklápění. Naklápěním zmíněných ramen je pak dosaženo přepínáním mezi pásovým a kolovým módem (obr. 19). V ose kloubu, kde dochází k naklápění ramene, je umístěno i hnací kolo. S hnacím kolem je spojeno pomocí pásu a s pojezdovým kolem pomocí ozubeného řemenu. Tím je zaručeno jak otáčení kola, tak pásu. Samotné otáčení hnacího kola je vyřešeno hřídelí, která prochází dutou hřídelí výkyvného ramena (obr. 18). Na každé rameno připadají 2 pohony. Jeden pro naklápění výkyvného ramena a druhý pro pohánění pásu a pojezdového kola. Všechny pohony jsou umístěny na rámu.



Obr. 17 *Varianta A*



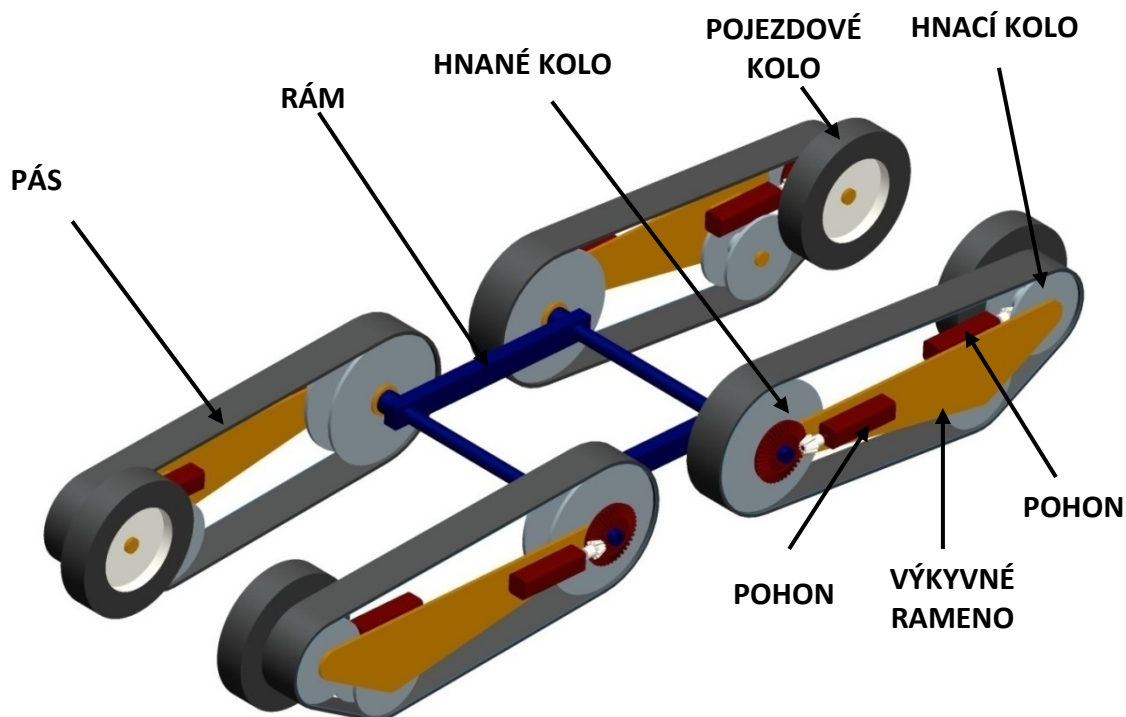
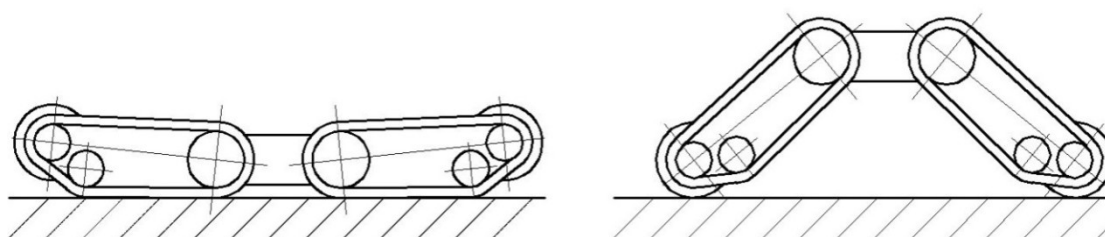
Obr. 18 Řešení kloubu v místě naklápění ramena a otáčení kola



Obr. 19 Pásový mód a kolový mód

4.2.2 Varianta B

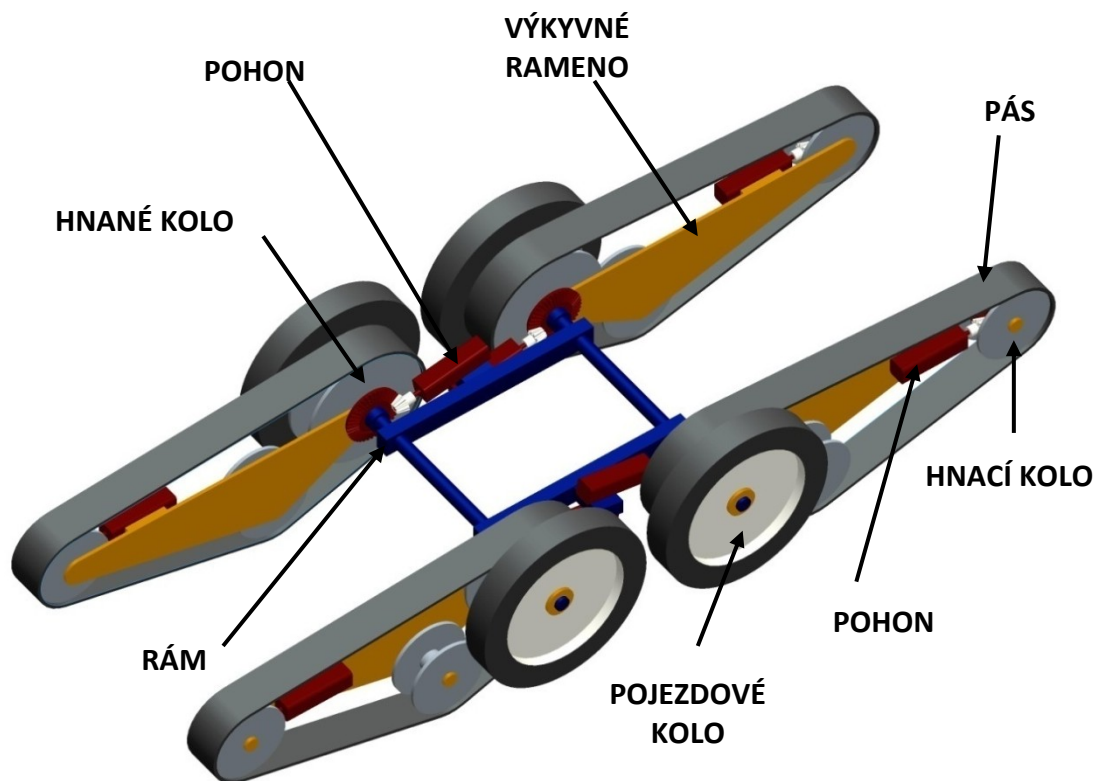
Variantou B (obr. 20) je čtyřpásový dvoustopý podvozek. Princip výkyvných ramen a přepínání mezi pásovým a kolovým módem je podobný jako u varianty A. Zásadní rozdíl spočívá v umístění hnacího kola a pojezdového kola. Ta jsou umístěná na konci výkyvného ramena dále od rámu. S tím pak souvisí i umístění prvního z pohonů pro pohánění pásu. Ten je situován rovněž na konci výkyvného ramena a je k němu pevně přichycen. Druhý z pohonů je umístěn taktéž na výkyvném rameni. K naklápění ramena dochází tak, že pohon zabírá do kuželového ozubeného kola, které je pevně spojeno s rámem. Na každé rameno tedy připadají opět 2 pohony. Jeden pro naklápění výkyvného ramena a druhý pro pohánění pásu a pojezdového kola. Důležitým faktorem je také geometrie pásu (obr. 21).

Obr. 20 *Varianta B*Obr. 21 *Pásový mód a kolový mód*

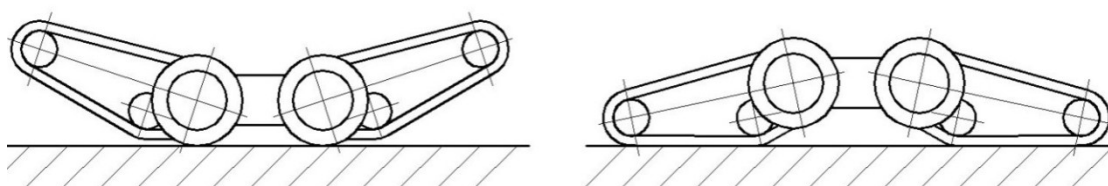
4.2.3 Varianta C

Varianta C (obr. 22) je obdobou varianty B. Zásadní rozdíl spočívá v umístění pojezdového kola a pohonu pro výkyvné rameno. Hnací kolo i jeho pohon jsou stále umístěny na konci výkyvného ramene, avšak pojezdové kolo je připevněno ke kole hnacímu. Tím je zaručeno, že se pojezdové kolo bude otáčet současně s kolem hnacím, jež je přes pás poháněno kolem hnacím. Pohon pro naklápění ramena je pak umístěn na rámu podvozku. K naklápění výkyvného ramena dochází záběrem pohonu do

kuželového ozubeného kola, které je pevně s ramenem spojeno. Na každé rameno tedy připadají 2 pohony. Opět zde hraje důležitou roli geometrie pásu (obr. 23).



Obr. 22 *Varianta C*



Obr. 23 *Kolový mód a pásový mód*

4.3 Výběr optimální varianty

Pro výběr optimální varianty je použito hodnotové analýzy. [2]

4.3.1 Kritéria rozhodování

Byla porovnávání variant byli zvoleny následující kritéria.

OZNAČENÍ KRITÉRIA	KRITÉRIUM	CHARAKTERISTIKA KRITÉRIA
K1	Hmotnost podvozku	Hmotnost lokomočního ústrojí
K2	Rozměry	Nejmenší dosažitelné půdorysné rozměry
K3	Složitost provedení	Počet použitých komponent a složitost montáže
K4	Manévrovatelnost	Schopnost změny směru na minimálním prostoru
K5	Stabilita	Stabilita při jízdě s využitím kol
K6	Modulárnost konstrukce	Možnost rychlé výměny důležitých komponent

Tab. 3 *Kritéria rozhodování*

4.3.2 Bodové hodnocení pro jednotlivá kritéria

ÚROVEŇ PLNĚNÍ FUNKCE	BODOVÉ HODNOCENÍ h_i
Vysoká úroveň	1
Dobrá úroveň	2
Průměrná úroveň	3
Nízká úroveň	4
Nevyhovující úroveň	5
Nepříznivý stav	6

Tab. 4 Bodové hodnocení

4.3.3 Zhodnocení kritérií pro jednotlivé varianty

KRITÉRIUM	VARIANTA A	VARIANTA B	VARIANTA C
K1	3	1	2
K2	2	1	2
K3	1	4	3
K4	3	3	1
K5	1	4	2
K6	4	2	2

Tab. 5 Zhodnocení kritérií

4.3.4 Stanovení významnosti kritérií

K určení významnosti bylo použito metody "porovnání v trojúhelníku párů".

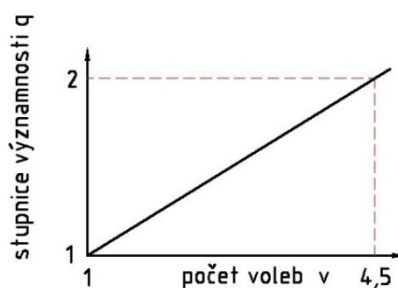
POROVNÁVANÉ PÁRY KRITÉRIÍ					POČET VOLEB v	POŘADÍ	VÁHA VÝZNAMNOSTI q_i
K1	K1	K1	K1	K1	1	4	1
K2	K3	K4	K5	K6			
	K2	K2	K2	K2	4,5	1	1,63
	K3	K4	K5	K6			
		K3	K3	K3	1	4	1
		K4	K5	K6			
			K4	K4	3,5	2	1,45
			K5	K6			
				K5	2,5	3	1,27
				K6	1	4	1

zvolení významnějšího
ze dvou kritérií

Tab. 6 Porovnání kritérií v trojúhelníku párů

4.3.5 Stanovení váhy významnosti a váženého indexu kritéria

Pro váhu významnosti q_i i -tého parametru byla zvolena lineární závislost (obr. 24).



Obr. 24 Stanovení váhy významnosti kritéria

$$q_i - 1 = \frac{2 - 1}{4,5 - 1} \cdot (v_i - 1) \quad (4.1)$$

$$q_i = \frac{1}{3,5} \cdot v_i + \frac{2,5}{3,5} \quad (4.2)$$

$$q_i = 0,29 \cdot v_i + 0,71 \quad (4.3)$$

Určení váženého indexu kritéria

$$I_i = q_i \cdot h_i \quad (4.4)$$

4.3.6 Výpočty celkových indexů variant

KRITÉRIUM	VARIANTA A		
	BODOVÉ HODNOCENÍ h_i	VÁHA VÝZNAMNOSTI q_i	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIA I_i
K1	3	1	3
K2	2	1,63	3,26
K3	1	1	1
K4	3	1,45	4,35
K5	1	1,27	1,27
K6	4	1	4
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ I_i			16,88

Tab. 7 Celkové zhodnocení varianty A

KRITÉRIUM	VARIANTA B		
	BODOVÉ HODNOCENÍ h_i	VÁHA VÝZNAMNOSTI q_i	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIA I_i
K1	1	1	1
K2	1	1,63	1,63
K3	4	1	4
K4	3	1,45	4,35
K5	4	1,27	5,08
K6	2	1	2
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ I_i			18,06

Tab. 8 Celkové zhodnocení varianty B

KRITÉRIUM	VARIANTA C		
	BODOVÉ HODNOCENÍ h_i	VÁHA VÝZNAMNOSTI q_i	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIA I_i
K1	2	1	2
K2	2	1,63	3,26
K3	3	1	3
K4	1	1,45	1,45
K5	2	1,27	2,54
K6	2	1	2
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ I_i			14,25

Tab. 9 Celkové zhodnocení varianty C

4.3.7 Zhodnocení variant

POŘADÍ	CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ I_i	VARIANTA
1	14,25	C
2	16,88	A
3	18,06	B

Tab. 10 *Zhodnocení variant*

Z vyhodnocení hodnotové analýzy se jako optimální jeví varianta C.

5 Rozbor hybridního podvozku

Základní parametry

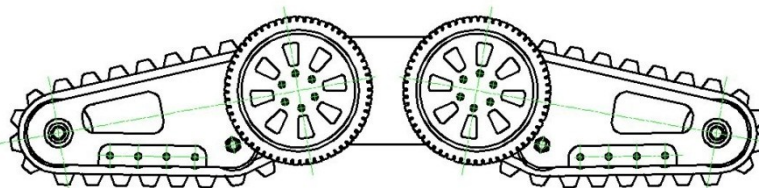
Maximální délka	1347[mm]
Minimální délka	575 [mm]
Šířka	500 [mm]
Maximální výška	646 [mm]
Minimální výška	275 [mm]
Rozsah pohybu ramen	$\pm 90[^\circ]$
Hmotnost	71 [kg]
Nosnost	19 [kg]
Rychlost - pásy	1 [m/s] = 3,6 [km/h]
Rychlost - kola	2,3 [m/s] = 8,3 [km/h]

Tab. 11 *Parametry podvozku*

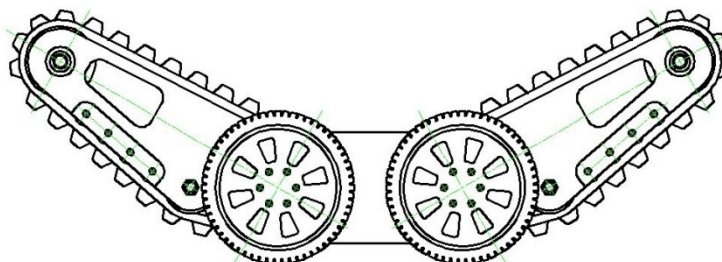
Navržený hybridní podvozek kombinuje dva druhy LÚ - kolové a pásové.

Primárním ústrojím je kolové. To je tvořeno čtyřmi pojezdovými koly. Každé pojezdové kolo má vlastní pohon a dohromady jsou řízeny diferenčně. To znamená, že pro otočení podvozku na místě je potřeba, aby se pojezdová kola na jedné straně podvozku otáčela protichůdně vůči kolům na straně druhé.

Součástí podvozku jsou čtyři výkyvná ramena, která představují pásové LÚ. Naklápěním ramen je podvozek schopen měnit svůj mód. Pokud jsou ramena sklopena dolů, kola nemají kontakt s terénem a zabírají tak pouze pásy umístěné na ramenech (obr. 25). V opačném případě jsou ramena s pásy zdvihnutá a zabírají pouze kola (obr. 26).

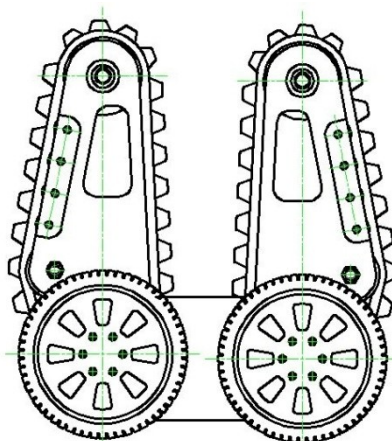


Obr. 25 Poloha výkyvných ramen při využití pásů



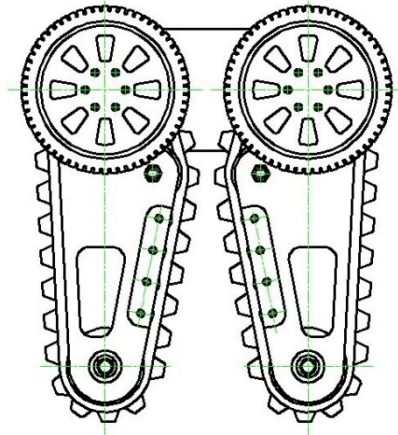
Obr. 26 Poloha výkyvných ramen při využití kol

V případě, že je potřeba zkrátit délku podvozku je možno zvednout výkyvná ramena do vertikální polohy směrem nahoru (obr. 27). V kontaktu s terénem zůstávají kola a není tím omezena schopnost podvozku se pohybovat. To může být využito například při využití výtahu, kde je prostor dosti omezen.



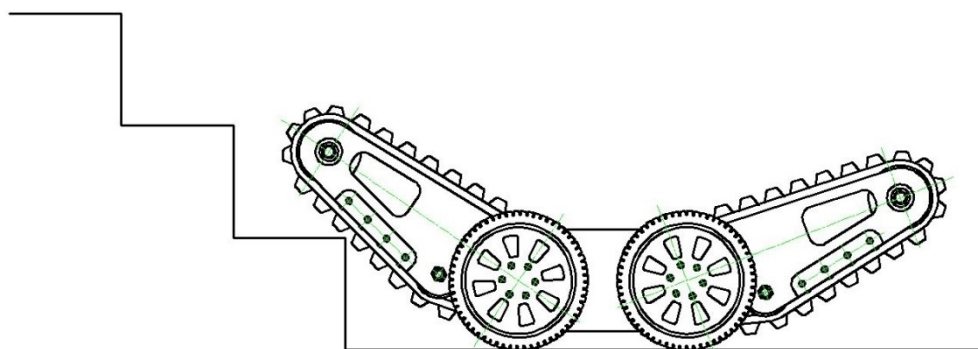
Obr. 27 Podvozek s rameny ve vertikální poloze 1

Další situace může nastat v případě, že se potřebujeme s manipulačním ramenem umístěným na podvozku dostat do vyšší pozice. V takovéto situaci se ramena mohou sklopit do vertikální polohy směrem dolů (obr 28). V kontaktu s terénem tak zůstávají pásy a to pouze malá část. I přesto se však může podvozek pohybovat, i když velmi omezenou rychlostí než je to v případě kol.

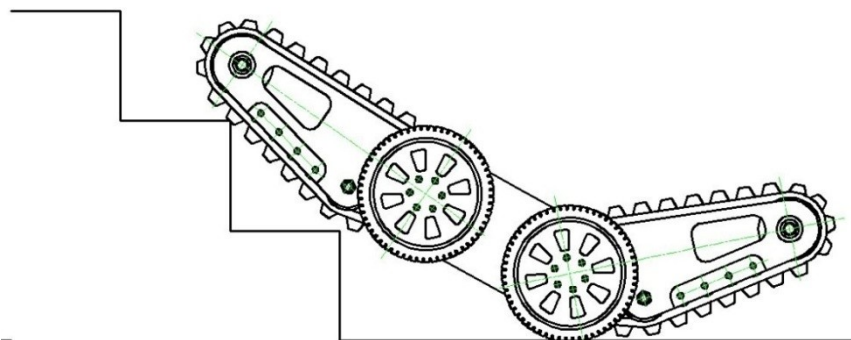


Obr. 28 Podvozek s rameny ve vertikální poloze 2

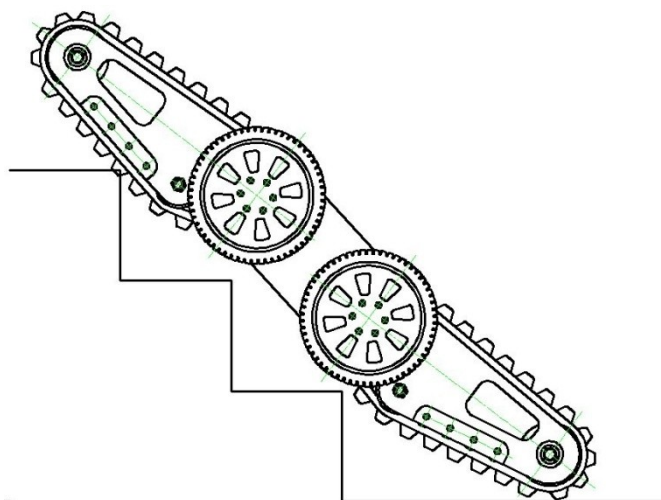
Posledním účelem výkyvných ramen je zdolávání překážek, speciálně vyjždění a sjíždění schodů. Toho dosáhneme různými kombinacemi naklápění výkyvných ramen a změnou kontaktních bodů (obr. 29 až obr. 32). Podle potřeby jsou ke zdolávání překážek nápomocna i pojezdová kola.



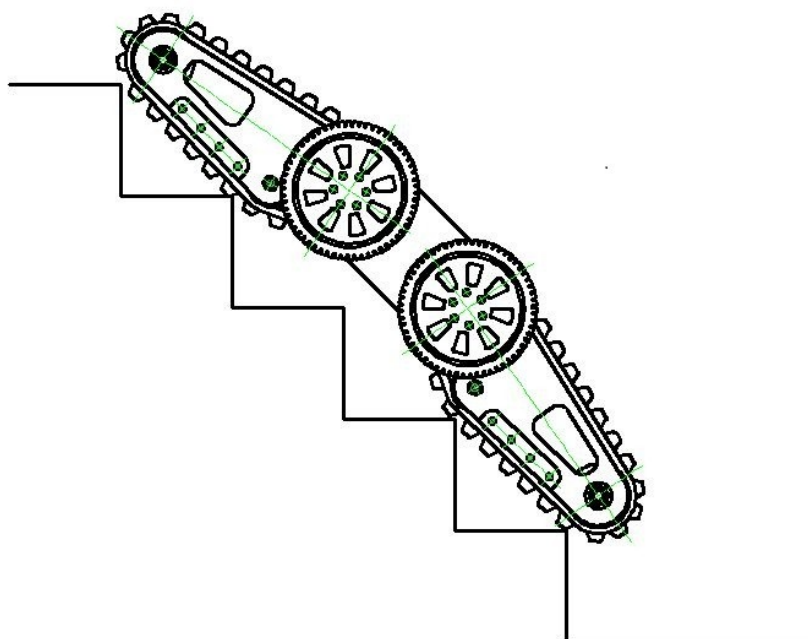
Obr. 29 Zdolávání schodů - fáze 1



Obr. 30 Zdolávání schodů - fáze 2



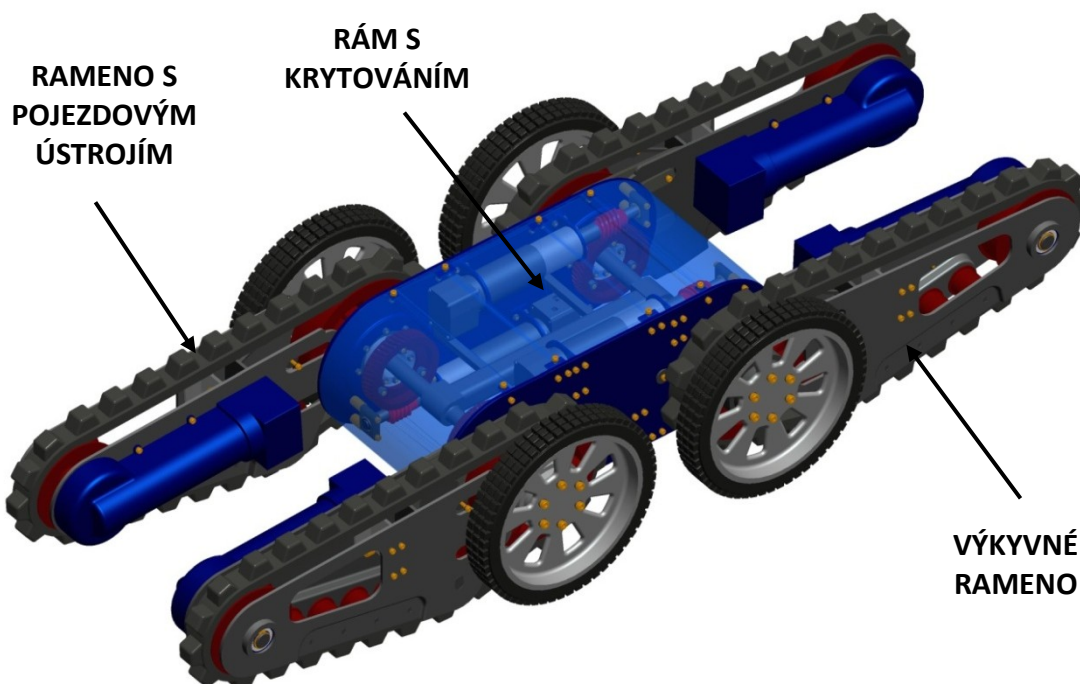
Obr. 31 Zdolávání schodů - fáze 3



Obr. 32 Zdolávání schodů - fáze 4

6 Popis konstrukce hybridního podvozku

Konstrukce podvozku robotu v sobě kloubí tři základní systémy (obr. 33). První systém tvoří rám spolu s krytováním. Druhý systém tvoří výkyvná ramena. Třetím systémem je samotné pojezdové ústrojí, které vzájemně propojuje jak část rámu, tak část výkyvného ramena.

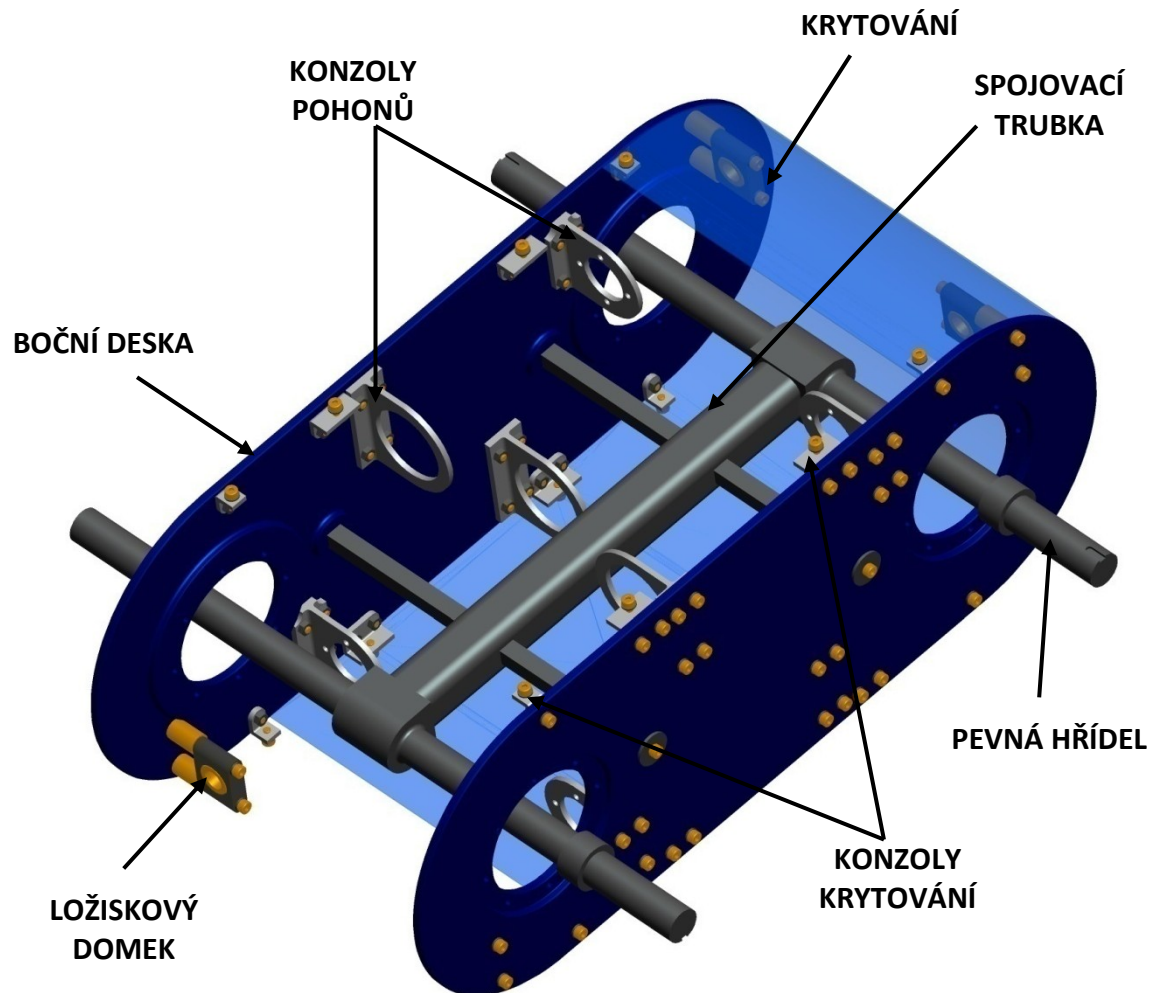


Obr. 33 Konstrukční řešení varianty C

6.1 Konstrukce rámu

Konstrukci rámu (obr. 34) tvoří především dvě pevné hřídele a dvě boční desky. Všechny čtyři prvky slouží jako nosné a jsou pevně propojeny ostatními částmi rámu (spojovací čtyřhranná trubka, vedlejší čtyřhranné tyče). Hřídele slouží jako nosný prvek pro řemenové hnané kolo spolu s pojezdovým kolem. Boční desky jsou zase určeny jako nosný prvek výkyvných ramen. Na vnitřních stranách bočních desek jsou umístěny konzoly pro uchycení pohonů a krytování. Na témže místě jsou umístěny ložiskové domky pro hřídele pohonů.

Krytování podvozku tvoří tenké plechy, které chrání prostor podvozku ze všech stran kromě boků. Tam funkci krytování suplují již zmíněné boční desky. Horní krytovací deska je navíc zesílena z důvodu většího zatížení ze strany instalovaných nástaveb (manipulační rameno, senzory, atd.).



Obr. 34 Konstrukce rámu

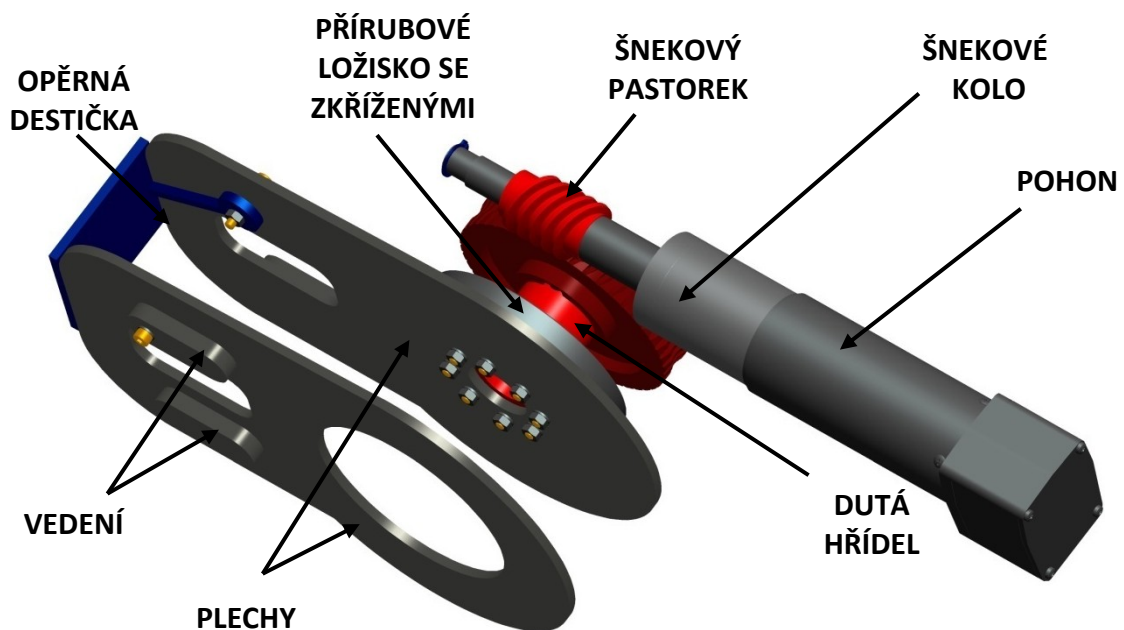
6.2 Konstrukce výkyvného ramene

Výkyvné rameno má dvě části. Část výkyvnou a část napínanou. Spojením všech částí ramene spolu s prvky pojezdového ústrojí, by mělo být dosaženo dostatečné tuhosti konstrukce ramene.

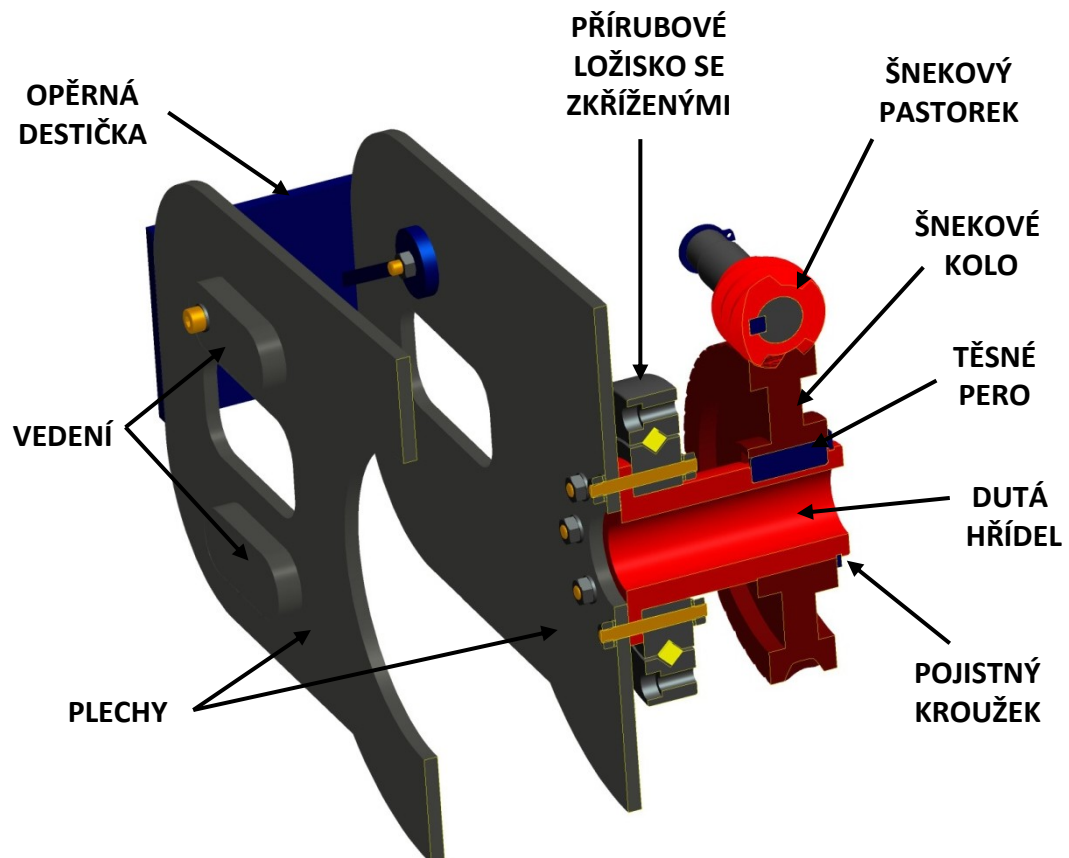
6.2.1 Výkyvná část

Výkyvnou část (obr. 35) tvoří dva plechy. Jeden plech je volně otočný, druhý plech je připevněn k vnitřnímu kroužku přírubového ložiska se zkříženými válečky. Vnější kroužek přírubového ložiska je pevně spojen z boční deskou rámu. Skrz ložisko prochází dutá hřídel (obr. 36). Ta je na jedné straně zakončena přírubou a propojuje tak plech s přírubovým ložiskem. Na opačné straně duté hřídele je umístěno šnekové kolo. Proti pootočení šnekového kola na hřídeli je zabráněno těsným perem a axiálnímu vysunutí brání pojistný kroužek. Záběrem šnekového pastorku do zubů šnekového kola pak dochází k naklápění celého ramene. Šnekový převod je samosvorný. To znamená, že jakýkoli krouticí moment působící na šnekové kolo neotočí šnekovým pastorkem. Tím odpadá potřeba brzdy pro pohon.

Oba plechy jsou spojeny opěrnou destičkou. Ta primárně slouží jako opěrná plocha pro systém dopínání pásu. Ke spojení napínané části s částí výkyvnou dochází v místě výstupků, které jsou umístěny na vnějších stranách plechů. Ty také plní úlohu vedení napínané části ramena.



Obr. 35 Výkyvná část ramene

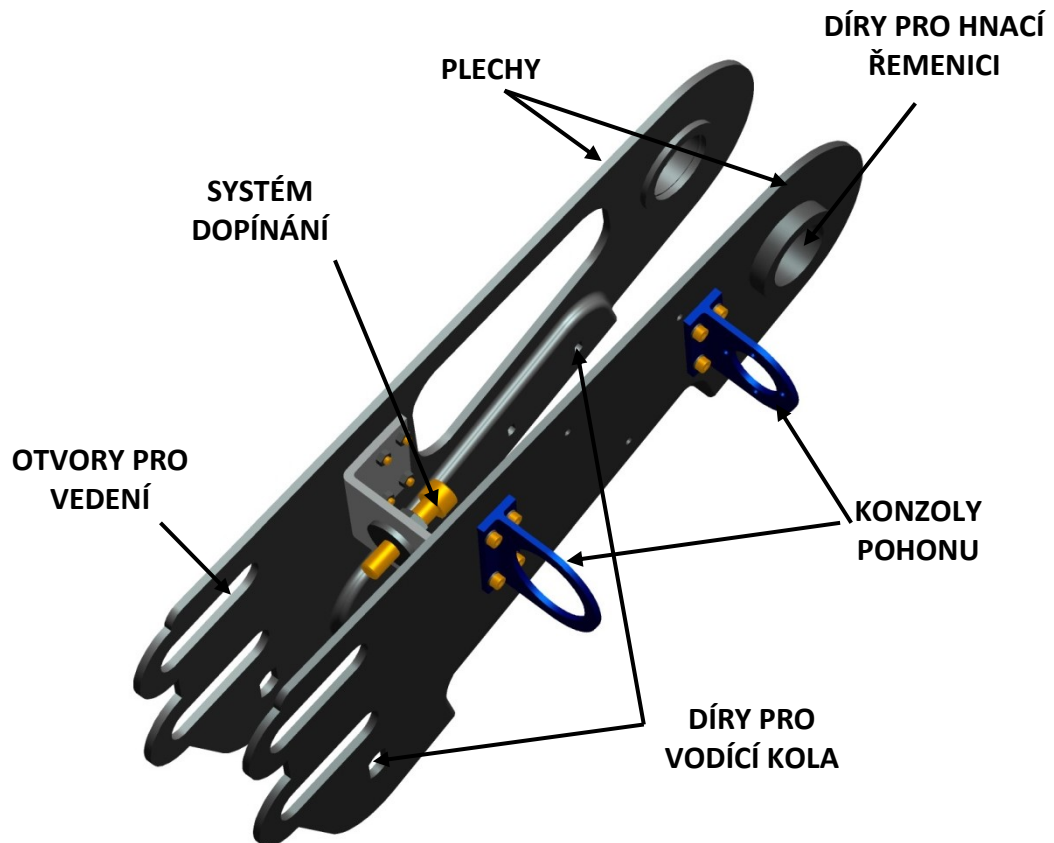


Obr. 36 Výkyvná část ramene - řez

6.2.2 Napínaná část ramene

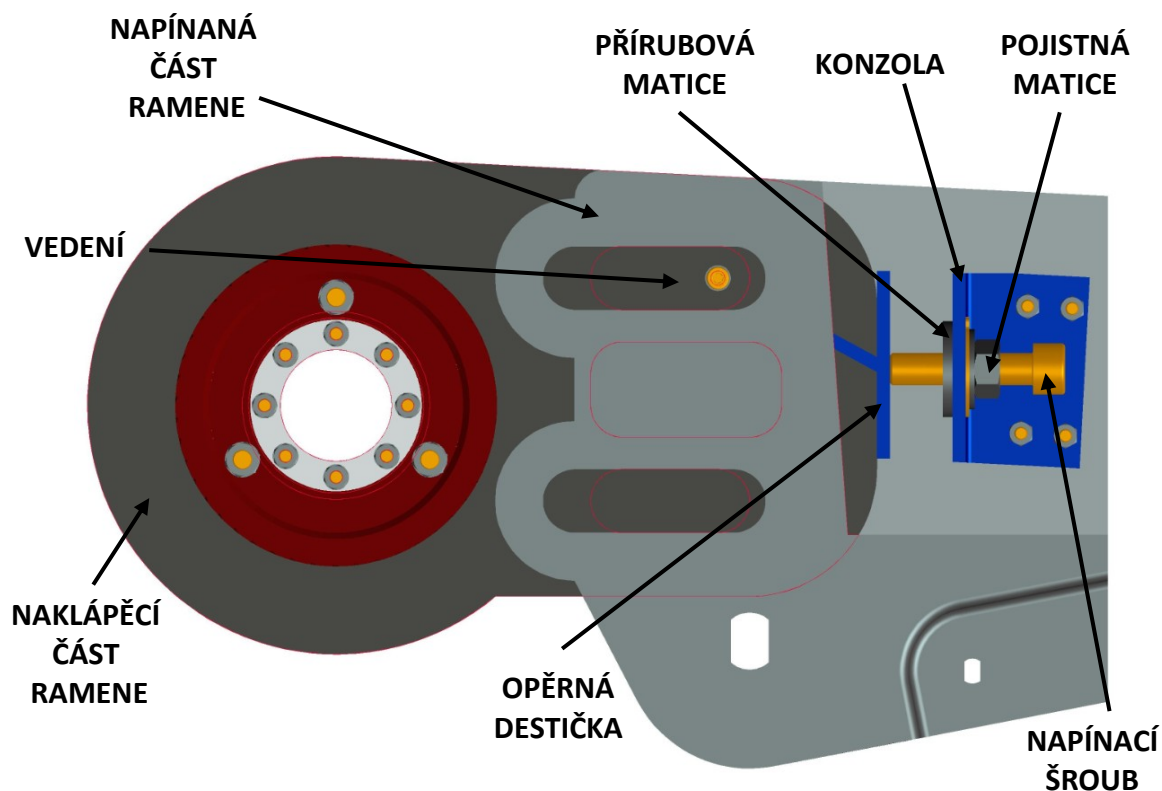
Napínanou část (obr. 37) tvoří dva plechy. Oba plechy jsou spojeny konzolou, jež je součástí systému napínání pásu. Na širším konci plechů jsou podlouhlé otvory. Navlečením plechů na výstupky (vedení) výkyvné části ramena pomocí těchto otvorů dojde ke spojení obou částí ramen. Výstupky jsou délkově menší než otvory, tudíž je zaručen pohyb napínané části v podélném směru, což je s výhodou využito pro napínání pásu.

Další otvory jsou určeny pro uložení hřídelí pohybového ústrojí - hnací řemenice, velkého vodícího kola a malých vodících kol. Na pravém plechu jsou umístěny konzoly pro připevnění pohonu spolu s krytváním pohonu.

Obr. 37 *Napínaná část ramene*

6.2.3 Systém napínání

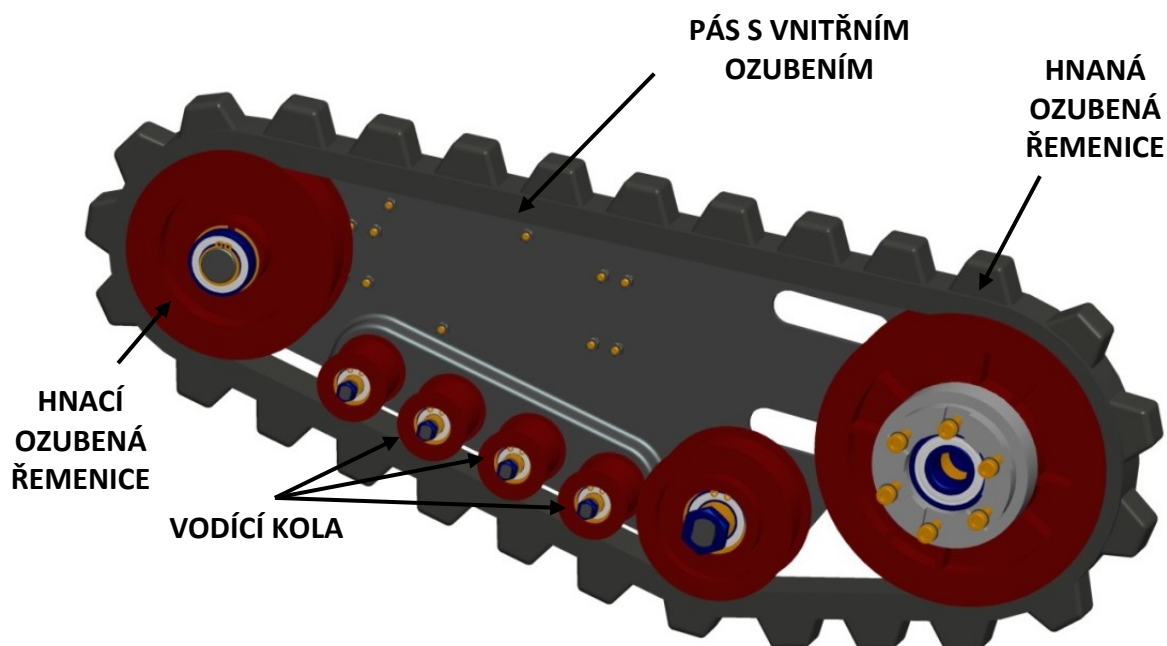
Napínání pásu je dosaženo pohybem napínané části ramene vůči kyvné části ramene. Pohyb obou částí vůči sobě probíhá prostřednictvím výstupků (vedení) na kyvné části a otvorů v části napínané. Tlak, potřebný pro napnutí pásu, je vyvíjen tlačení šroubu do opěrné destičky výkyvné části ramene. Opíráním se destičky o hřbety plechů je dosaženo potřebného protitlaku. Šroub je umístěn spolu s přírubovou maticí na konzole napínané části. Proti samovolnému pootočení šroubu zabraňuje další přídatná matice.



Obr. 38 Systém napínání - částečný řez

6.3 Konstrukce pojezdového ústrojí

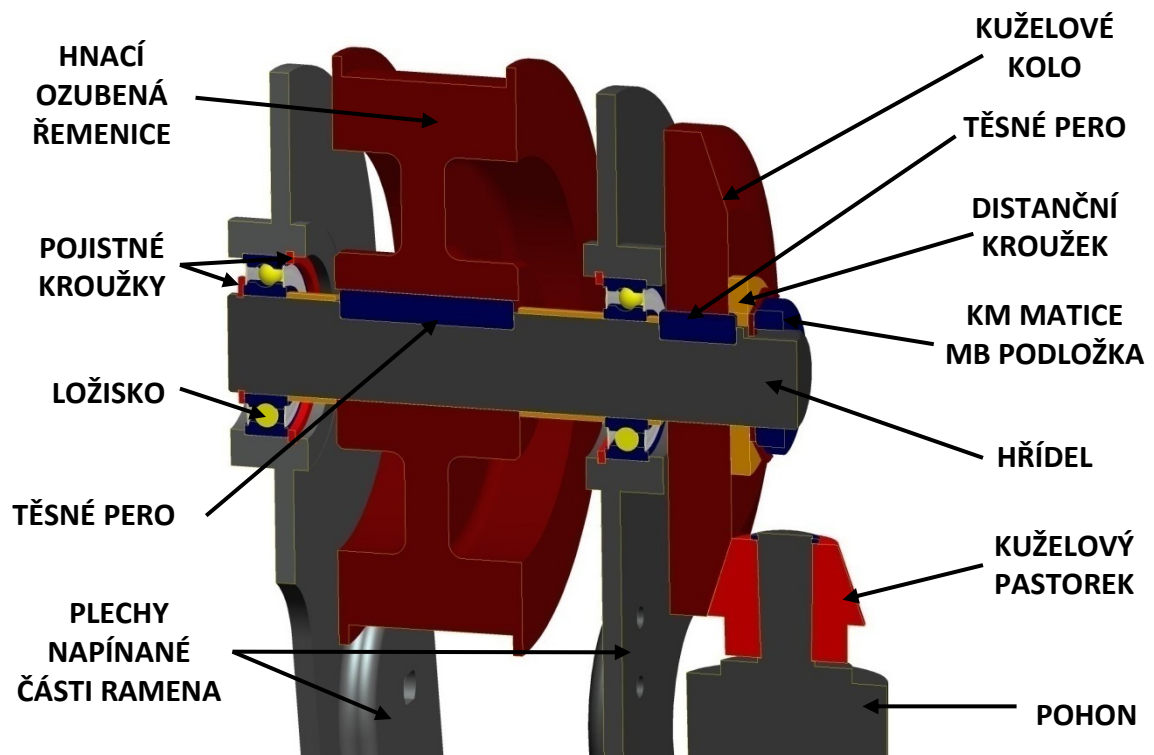
Pohybové ústrojí (obr. 39) tvoří především hnací malá ozubená řemenice a velká hnaná ozubená řemenice. Na řemenicích je nasazen pás, který je z vnitřní strany opatřen ozubením. Záběrem zubů hnací řemenice do ozubení pásu dochází k pohybu pásu a otáčení hnané řemenice. K dotvoření potřebné geometrie pásu slouží velké vodící kolo a malá vodící kola. Ta jsou již bez ozubení. Součástí hnané řemenice je pojezdové kolo.



Obr. 39 Pojezdové ústrojí

6.3.1 Hnací řemenice

Hnací řemenice je navlečena na hřídeli spolu s kuželovým kolem s přímým ozubením (obr. 40). Proti pootočení vůči hřídeli jsou obě kola zajištěna těsným perem. Samotná hřídel je uložena v jednořadých kuličkových ložiscích a ty jsou dále uložena v pleších napínané části ramena. K odsazení jednotlivých komponent na hřídeli je řešeno pomocí distančních kroužků. Proti axiálnímu posunutí je celý uzel zajištěn z jedné strany pojistným kroužkem a z druhé strany KM maticí spolu s MB podložkou. Záběrem kuželového pastorku pohonu do kuželového kola na hřídeli dochází k přenosu momentu na hnací řemenici a následnému otáčení řemenice. Ložiska jsou opatřena těsněním.

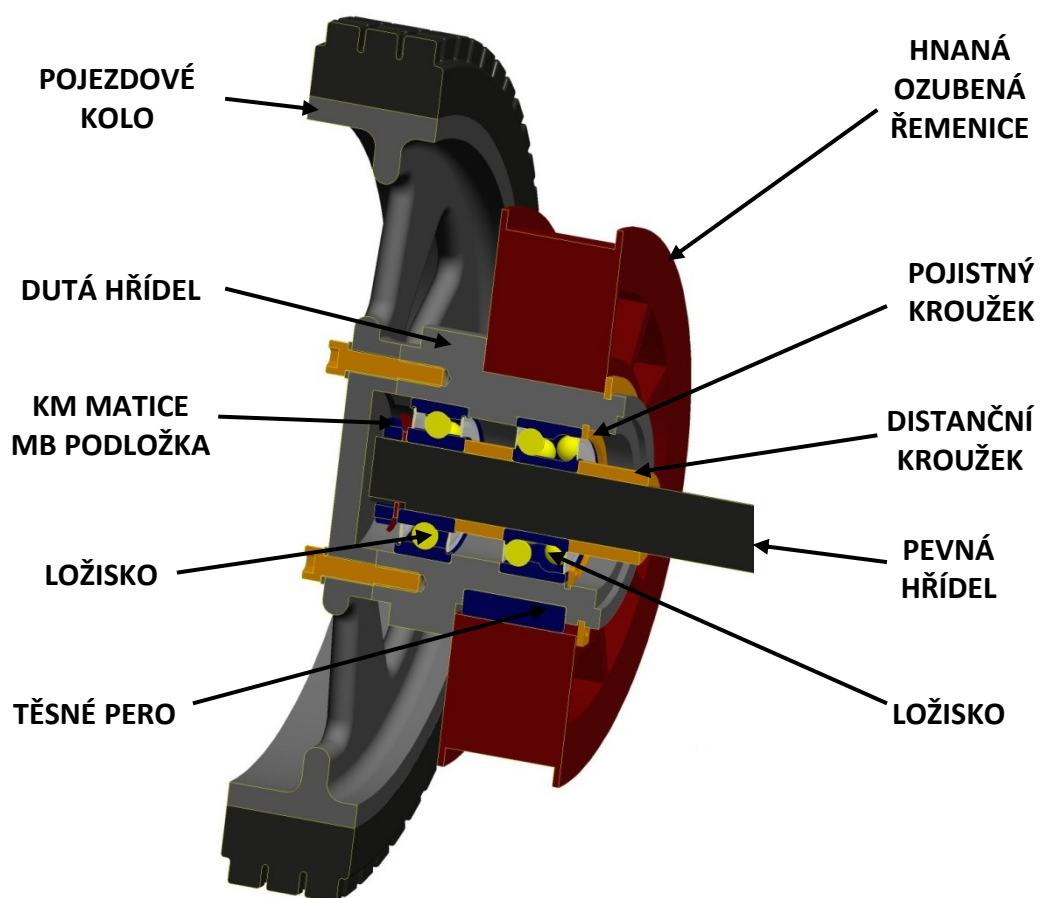


Obr. 40 Uložení hnací řemenice - řez

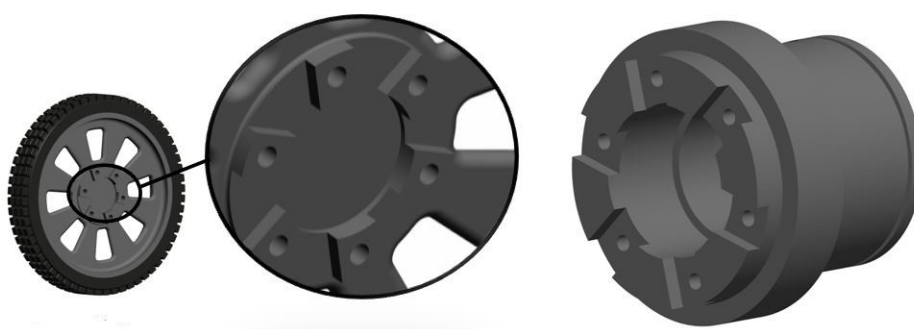
6.3.2 Hnaná řemenice

Hnaná řemenice je uložena na duté hřídeli (obr. 41). Proti pootočení řemenice vůči duté hřídeli je zabráněno použitím těsného pera. Proti vysunutí v axiálním směru je zajištěna pojistným kroužkem. Samotná dutá hřídel se prostřednictvím ložisek (jednořadé kuličkové ložisko, dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem) otáčí kolem pevné hřídele rámu. Polohy ložisek jsou vymezena distančními kroužky. K zabránění vysunutí ložisek v axiálním směru je využito KM matice a MB podložky. Ložiska jsou opatřena těsněním.

K duté hřídeli je připevněno pojezdové kolo. Ke spojení jsou použity šrouby v kombinaci se specifickým tvarovým zakončením obou komponent. Ve chvíli záběru pásu (s vnitřním ozubením) do hnané řemenice dochází současně k přenosu momentu na pojezdové kolo a tím pádem i následného otáčení pojezdového kola.



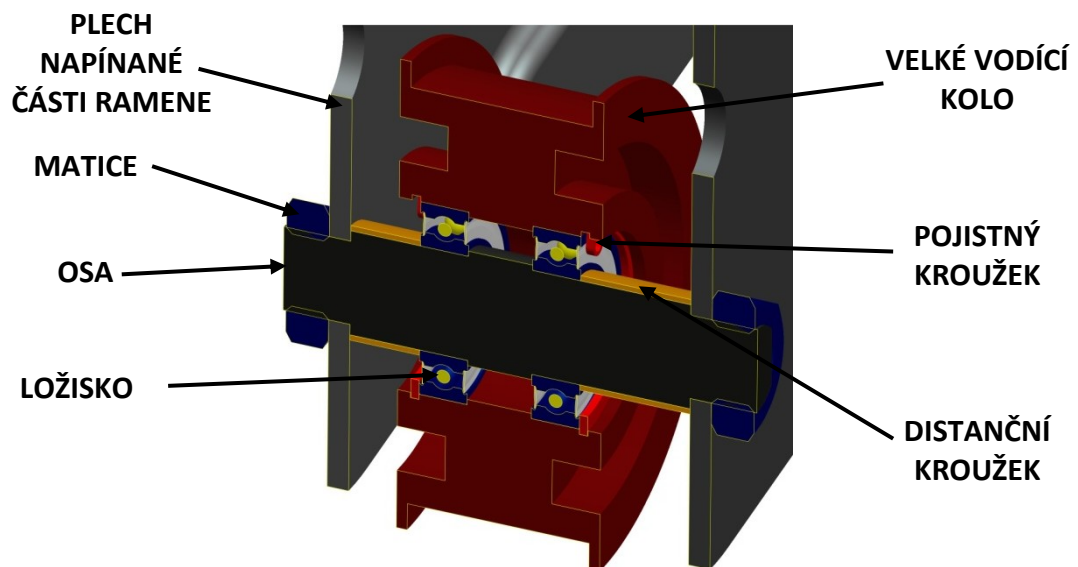
Obr. 41 Uložení hnané řemenice - řez



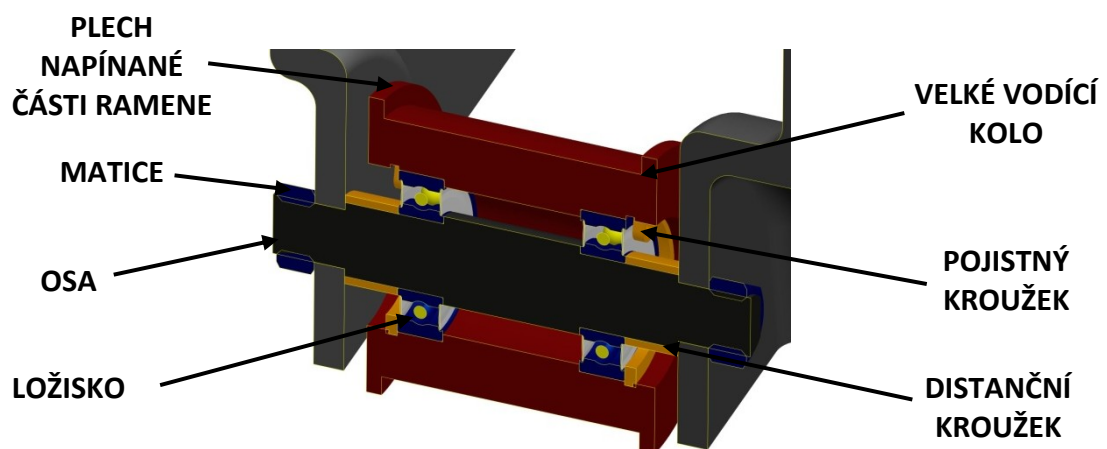
Obr. 42 Tvarové zakončení pojezdového kola a duté hřídele

6.3.3 Vodící kola

Konstrukční provedení velkého vodícího kola (obr. 43) a malých vodících kol (obr. 44) je totožný. Rozdíl spočívá pouze v rozměrech. Pojezdové kolo je vždy uloženo prostřednictvím jednořadých kuličkových ložisek na osách. Poloha ložisek je vymezena pomocí distančních kroužků. Samotná osa je pak uložena v pleších napínané části ramena. Axiálnímu pohybu vůči plechům je zabráněno vybráním a sražením boků na koncích os. Spojením os a obou plechů za použití matic je celkově zvýšena tuhost celého výkyvného ramene.



Obr. 43 Velké vodící kolo - řez



Obr. 44 Malé vodící kolo - řez

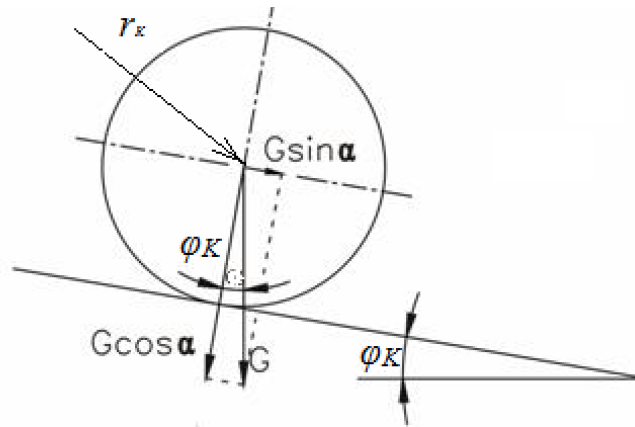
7 Kontrolní výpočty

7.1 Návrh hnacího pohonu pojezdového kola

Vstupní parametry pro dimenzování pohonu

Rychlost podvozku (kola)	$v_K = 2,3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$
Zrychlení podvozku (kola)	$a_K = 0,2 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Hmotnost podvozku	$m_P = 71 \text{ [kg]}$
Nosnost podvozku	$m_N = 19 \text{ [kg]}$
Poloměr pojezdového kola	$r_K = 0,130 \text{ [m]}$
Kruhový oblouk hnací (malé) řemenice	$o_{MR} = 0,162 \text{ [m]}$
Kruhový oblouk hnané (velké) řemenice	$o_{VR} = 0,229 \text{ [m]}$
Počet kol	$s_K = 4 \text{ [-]}$
Počet poháněných kol	$s = 4 \text{ [-]}$
Součinitel vlivu rotačních částí	$\theta = 1,5 \text{ [-]}$
Převod kuželového soukolí	$i_{KS} = 3 \text{ [-]}$
Tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Úhel stoupání nakloněné roviny (kola)	$\varphi_K = 22,5 \text{ [}^\circ\text{]}$
Koeficient valivého odporu kola	$\mu_K = 0,1 \text{ [-]}$
Koeficient bezpečnosti	$k_b = 1,2 \text{ [-]}$

Výpočet potřebného momentu a otáček



Obr. 45 Odpor stoupání na nakloněné rovině

Celková hmotnost podvozku i s předpokládanou nosností

$$m_c = m_p + m_N = 71 + 19 = 90 \text{ [kg]} \quad (6.1)$$

Hnací moment pojezdového kola. Do výpočtu je zahrnut koeficient bezpečnosti k_b . Takto je ošetřena účinnost pásu (ozubeného řemenu) a kuželového soukolí, které nejsou ve výpočtu zahrnuty. [8]

$$\begin{aligned} M_K &= \left(\frac{1}{s_K} \cdot \left(\frac{\eta_K \cdot m_c \cdot g \cdot \cos \varphi_K}{s} + m_c \cdot g \cdot \sin(\varphi_K) + \theta \cdot m_c \cdot a_K \right) \cdot r_K \right) \cdot k_b = \\ &= \left(\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 90 \cdot 9,81 \cdot \cos \varphi_K}{4} + 90 \cdot 9,81 \cdot \sin 22,5 + 1,5 \cdot 90 \cdot 0,2 \right) \right) \cdot 1,2 \\ &= 14,92 \text{ [Nm]} \end{aligned} \quad (6.2)$$

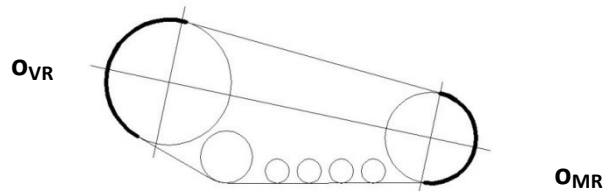
Úhlová rychlost hnané části pojezdového ústrojí včetně pojezdového kola

$$\omega_K = \frac{v_K}{r_K} = \frac{2,3}{0,130} = 17,69 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (6.3)$$

Otáčky hnané části pojezdového ústrojí včetně pojezdového kola

$$n_K = \frac{60 \cdot \omega_K}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 17,69}{2 \cdot \pi} = 168,95 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6.3)$$

Z důvodu odlišné geometrie pásu (ozubeného řemenu) nelze vypočítat převodový poměr mezi hnací řemenicí a hnanou řemenicí klasickým způsobem (poměr průměru kružnic řemenic). Z tohoto důvodu jsou k výpočtu převodového poměru použity délky kruhových oblouků řemenic, které jsou v záběru.



Obr. 46 Délky kruhových oblouků

Převodový poměr pásu mezi hnanou a hnací řemenicí

$$i_P = o_{VR}/o_{MR} = 0,229/0,162 = 1,42 [-] \quad (6.4)$$

Přepočet momentu z hnané řemenice na pastorek kuželového soukolí

$$M_C = \frac{M_K}{i_P \cdot i_{KS}} = \frac{14,92}{1,42 \cdot 3} = 3,49 [Nm] \quad (6.5)$$

Přepočet otáček z hnané řemenice na pastorek kuželového soukolí

$$n_C = n_K \cdot i_P \cdot i_{KS} = 168,95 \cdot 1,42 \cdot 3 = 719,72 [min^{-1}] \quad (6.6)$$

Návrh pohonu

Na základě celkového požadovaného momentu a celkových požadovaných otáček byl vybrán bezkartáčový motor MAXON EC 45 - 136211 a planetová převodovka MAXON GP 52 C - 223084.

Motor MAXON EC 45

$$P_M = 250 [W]$$

$$M_M = 0,283 [Nm]$$

$$n_M = 10\,600 [min^{-1}]$$

$$m_M = 1,15 [kg]$$

Planetová převodovka MAXON GP 52 C

$$M_{MAX} = 15 [Nm]$$

$$i_{PR} = 15 [-]$$

$$\eta_{PR} = 83 [\%]$$

$$m_{PR} = 0,620 [kg]$$

Kontrola pohonu

Výstupní moment z převodovky

$$M_{PR} = M_M \cdot i_{PR} \cdot \eta_{PR} = 0,283 \cdot 15 \cdot 0,83 = 3,52 \text{ [Nm]} \quad (6.7)$$

Výstupní otáčky z převodovky

$$n_{PR} = \frac{n_M}{i_{PR}} = \frac{10\,900}{15} = 726,66 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6.8)$$

$$M_C < M_{PR}$$

$$3,49 \text{ [Nm]} < 3,52 \text{ [Nm]}$$

Výstupní krouticí moment z převodovky je větší než požadovaný celkový moment zátěže. Pohon vyhovuje.

$$N_C < N_{PR}$$

$$719,72 \text{ [min}^{-1}\text{]} < 726,66 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

Výstupní otáčky z převodovky jsou větší než celkové požadované otáčky zátěže. Pohon vyhovuje

7.2 Návrh hnacího pohonu pásu

Vstupní parametry pro dimenzování pohonu

Rychlost podvozku (pásky)

$$v_P = 1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

Zrychlení podvozku (pásky)

$$a_P = 0,2 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$$

Hmotnost podvozku i s předpokládanou nosností

$$m_C = 90 \text{ [kg]}$$

Poloměr hnací (malé) řemenice

$$r_{MR} = 0,055 \text{ [m]}$$

Poloměr hnané (velké) řemenice

$$r_{VR} = 0,078 \text{ [m]}$$

Poloměr velkého vodícího kola

$$r_{VK} = 0,04 \text{ [m]}$$

Poloměr malého vodícího kola

$$r_{MK} = 0,018 \text{ [m]}$$

Moment setrvačnosti hnací řemenice

$$I_{MR} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

Moment setrvačnosti hnané řemenice

$$I_{VR} = 22 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Moment setrvačnosti velkého vodícího kola

$$I_{VK} = 0,4 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Moment setrvačnosti malého vodícího kola

$$I_{MK} = 0,06 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Úhel stoupání nakloněné roviny (pásky)

$$\varphi_P = 45 [^\circ]$$

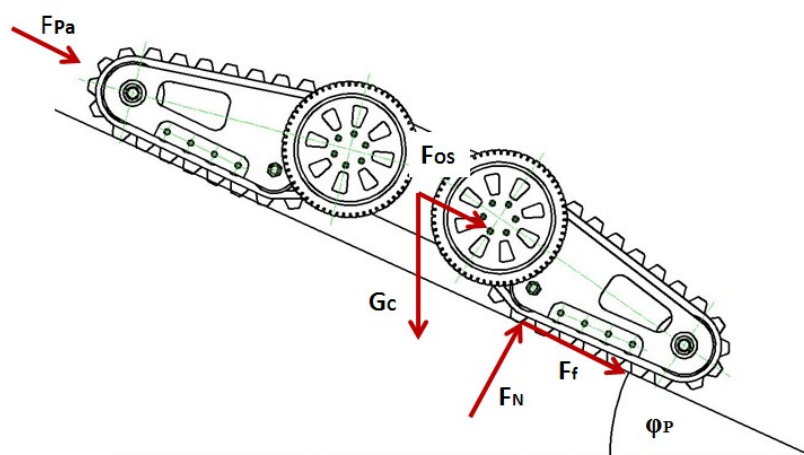
Koeficient valivého odporu pásu (písek) [3/]

$$\mu_P = 0,2 [-]$$

Koeficient bezpečnosti

$$k_b = 1,3 [-]$$

Výpočet potřebného momentu a otáček [3]



Obr. 47 Síly působící na podvozek robotu při pohybu po nakloněné rovině

Gravitační síla působící na podvozek

$$G_C = m_C \cdot g = 90 \cdot 9,71 = 882,9 [\text{N}] \quad (6.9)$$

Normálová reakce vozovky

$$F_N = G_P \cdot \cos \varphi_P = 882,9 \cdot \cos 45^\circ = 624,31 [\text{N}] \quad (6.10)$$

Valivý odpor vypočítaný z normálové reakce vozovky

$$F_f = \mu_P \cdot F_N = 0,2 \cdot 624,31 = 124,86 [\text{N}] \quad (6.11)$$

Odpor stoupání

$$F_{OS} = G_C \cdot \sin \varphi_P = 882,9 \cdot \sin 45^\circ = 624,31 \text{ [N]} \quad (6.12)$$

Setrvačná síla podvozku

$$F_{Pa} = m_C \cdot a_P = 90 \cdot 0,2 = 14 \text{ [N]} \quad (6.13)$$

Celkovou potřebnou sílu k rozjezdu podvozku po nakloněné rovině získáme součtem síly valivého odporu, odporu stoupání a setrvačné síly. Odpor vzduchu se zanedbává.

$$F_C = F_f + F_{OS} + F_{Pa} = 124,86 + 624,31 + 14 = 767,17 \text{ [N]} \quad (6.14)$$

Jelikož pohyb podvozku zajišťují čtyři pásy, je třeba i potřebnou sílu podělit čtyřmi.

$$F_{C4} = F_C / 4 = 767,17 / 4 = 191,8 \text{ [N]} \quad (6.15)$$

Získanou sílu pak použijeme pro výpočet potřebného momentu pro pohánění hnací řemenice a pásu

$$M_P = F_{C4} \cdot r_{MR} = 191,8 \cdot 0,055 = 10,55 \text{ [Nm]} \quad (6.16)$$

Do výpočtu je také třeba zahrnout krouticí moment k překonání odporu všech rotujících hmot - hnací řemenice, hnaná řemenice, vodící kola a další prvky, které tvoří pojezdové ústrojí.

$$\begin{aligned} M_{RH} &= a_P \cdot \left(\frac{I_{MR}}{r_{MR}} + \frac{I_{VR}}{r_{VR}} + \frac{I_{VK}}{r_{VK}} + 4 \cdot \frac{I_{MK}}{r_{MK}} \right) = \\ &= 0,5 \cdot \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{0,055} + \frac{22 \cdot 10^{-3}}{0,078} + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,04} + 4 \cdot \frac{0,6 \cdot 10^{-4}}{0} \right) \\ &= 0,167 \text{ [Nm]} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Potřebný moment na hnací řemenici získáme součtem potřebného momentu pro pohánění hnací řemenice a pásu a momentu potřebného pro překonání odporu rotujících hmot. Získanou hodnotu navíc vynásobíme koeficientem bezpečnosti k_b .

$$M_{HR} = (M_P + M_{RH}) \cdot k_b = (10,55 + 0,167) \cdot 1,3 = 13,8 \text{ [Nm]} \quad (6.18)$$

Úhlová rychlost hnací řemenice

$$\omega_{MR} = \frac{v_P}{r_{MR}} = \frac{1}{0,055} = 18,18 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (6.19)$$

Otáčky hnací řemenice

$$n_{HR} = \frac{60 \cdot \omega_{MR}}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 18,18}{2 \cdot \pi} = 173,62 [\text{min}^{-1}] \quad (6.20)$$

Přepočet momentu z hnací řemenice na pastorek kuželového soukolí

$$M_C = \frac{M_{HR}}{i_{KS}} = \frac{13,8}{3} = 3,45 [\text{Nm}] \quad (6.21)$$

Přepočet otáček z hnací řemenice na pastorek kuželového soukolí

$$n_C = n_{HR} \cdot i_{KS} = 173,62 \cdot 3 = 694,48 [\text{min}^{-1}] \quad (6.22)$$

Návrh a kontrola pohonu

Pojezdové kolo, pás i hnací řemenice využívají stejný pohon (viz. kapitola 6.1). Z tohoto důvodu je provedena pouze kontrola, zda daný pohon vyhovuje.

$$M_C < M_{PR}$$

$$3,45 [\text{Nm}] < 3,52 [\text{Nm}]$$

Výstupní krouticí moment z převodovky je větší než požadovaný celkový moment zátěže. Pohon vyhovuje.

$$N_C < N_{PR}$$

$$694,48 [\text{min}^{-1}] < 726,66 [\text{min}^{-1}]$$

Výstupní otáčky z převodovky jsou větší než celkové požadované otáčky zátěže. Pohon vyhovuje

7.3 Návrh pohonu výkyvného ramena

Vstupní parametry pro dimenzování pohonu

Úhlová rychlost výkyvného ramena

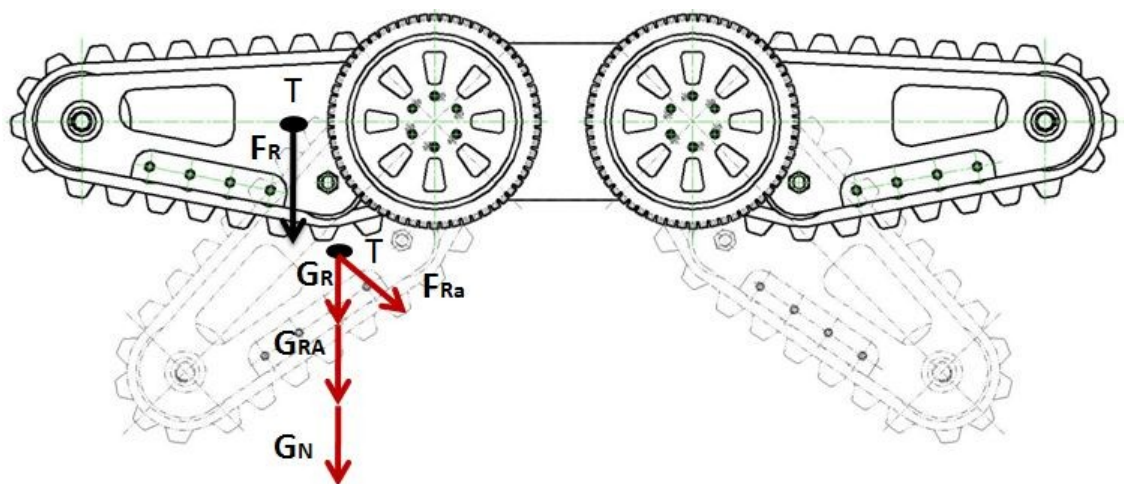
$$\omega_R = 2 [\text{s}^{-1}]$$

Tečné zrychlení výkyvného ramena (v těžišti)

$$a_R = 0,2 [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Hmotnost výkyvného ramena	$m_R = 14,49 \text{ [kg]}$
Hmotnost rámu	$m_{RA} = 12,5 \text{ [kg]}$
Nosnost podvozku	$m_N = 19 \text{ [kg]}$
Vzdálenost těžiště výkyvného ramena od osy otáčení	$r_T = 0,175 \text{ [m]}$
Převod šnekového soukolí	$i_{SS} = 47 \text{ [-]}$
Účinnost šnekového převodu	$\eta_{SS} = 54 \text{ [%]}$
Koeficient bezpečnosti	$k_b = 1,3 \text{ [-]}$

Výpočet potřebného momentu a otáček



Obr. 48 *Síly působící na výkyvné rameno*

Výpočet vychází z předpokladu, že všechny síly (gravitační, dynamická) působí na podvozek v těžišti výkyvného ramena. Celková síla je součtem všech těchto sil a největší hodnoty F_R dosahuje při poloze ramen v horizontální poloze.

Síla potřebná pro překonání gravitační síly působící na výkyvné rameno

$$G_R = m_R \cdot g = 14,49 \cdot 9,81 = 142,15 \text{ [N]} \quad (6.23)$$

Dynamická síla potřebná pro otočení ramena

$$F_{Ra} = m_R \cdot a_R = 14,49 \cdot 0,2 = 2,90 \text{ [N]} \quad (6.24)$$

Síla potřebná pro překonání gravitační síly působící na rám

$$G_{RA} = m_{RA} \cdot g = 12,5 \cdot 9,81 = 122,63 \text{ [N]} \quad (6.25)$$

Výsledná síla se rozloží na dvě výkyvná ramena

$$G_{RA2} = G_{RA}/2 = 122,63/2 = 61,32 \text{ [N]} \quad (6.26)$$

Síla potřebná pro překonání gravitační síly vzhledem k nosnosti

$$G_N = m_N \cdot g = 19 \cdot 9,81 = 186,40 \text{ [N]} \quad (6.27)$$

Výsledná síla se rozloží na dvě výkyvná ramena

$$G_{N2} = G_N/2 = 186,40/2 = 93,20 \text{ [N]} \quad (6.28)$$

Celková síla, kterou musí výkyvné rameno překonat

$$F_R = G_R + G_{RA2} + G_{N2} + F_{Ra} = 142,15 + 61,32 + 93,2 + 2,9 = 299,55 \text{ [N]} \quad (6.30)$$

Hnací moment výkyvného ramena

$$M_R = (F_R \cdot r_T) \cdot k_b = (299,55 \cdot 0,175) \cdot 1,3 = 68,15 \text{ [Nm]} \quad (6.31)$$

Otáčky výkyvného ramena

$$n_{VR} = \frac{60 \cdot \omega_R}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 2}{2 \cdot \pi} = 19,1 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6.32)$$

Přepočítání momentu z výkyvného ramena na pastorek šnekového soukolí

$$M_C = \frac{M_R}{i_{SS} \cdot \eta_{SS}} = \frac{68,15}{47 \cdot 0,54} = 2,685 \text{ [Nm]} \quad (6.33)$$

Přepočítání otáček na pastorek šnekového soukolí

$$n_C = n_R \cdot i_{SS} = 19,1 \cdot 47 = 897,64 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6.34)$$

Návrh pohonu

Na základě celkového požadovaného momentu a celkových požadovaných otáček byl vybrán bezkartáčový motor MAXON EC 45 - 136211 a planetová převodovka MAXON GP 52 C - 223086.

Motor MAXON EC 45

$$P_M = 250 [W]$$

$$M_M = 0,283 [Nm]$$

$$U = 36 [V]$$

$$n_M = 10\,600 [min^{-1}]$$

$$m_M = 1,15 [kg]$$

Planetová převodovka MAXON GP 52 C

$$M_{MAX} = 15 [Nm]$$

$$i_{PR} = 12 [-]$$

$$\eta_{PR} = 83 [\%]$$

$$m_{PR} = 0,620 [kg]$$

Kontrola pohonu

Výstupní otáčky z převodovky

$$n_{PR} = \frac{n_M}{i_{PR}} = \frac{10\,600}{12} = 908,34 [min^{-1}] \quad 6.35$$

Výstupní moment z převodovky

$$M_{PR} = M_M \cdot i_{PR} \cdot \eta_{PR} = 0,283 \cdot 12 \cdot 0,83 = 2,719 [Nm] \quad 6.36$$

$$M_C < M_{PR}$$

$$2,685 [Nm] < 2,719 [Nm]$$

Výstupní krouticí moment z převodovky je větší než požadovaný celkový moment zátěže. Pohon vyhovuje.

$$N_C < N_{PR}$$

$$897,64 [min^{-1}] < 908,34 [min^{-1}]$$

Výstupní otáčky z převodovky je větší než požadovaný celkový moment zátěže. Pohon vyhovuje.

8 Závěr

Diplomová práce byla vypracována na základě kladených požadavků a její vypracování odpovídá zadání diplomové práce.

V úvodu diplomové práce je nastíněno, jakým směrem se má cíl diplomové práce ubírat a jaké výsledky může přinést. Jako první byla provedena analýza kolových a pásových podvozků obecně, jejich výhody a nevýhody. Pak byla provedena analýza podvozků již existujících robotů, které kombinují pásová a kolová LÚ.

Na základě analýz bylo definováno prostředí nasazení robotu a vytipované servisní úlohy, jež bude s využitím hybridního podvozku vykonávat. Provedené analýzy dále přispěly k definování požadovaných parametrů podvozku a k sestavení morfologické matice. S využitím tohoto nástroje byly z velkého množství kombinačních možností navrženy tři varianty řešení. Pomocí hodnotové analýzy byla vybrána ta varianta, která se na základě zvolených parametrů hodnocení jevila jako optimální. Tato varianta pak byla dále konstrukčně zpracována a doplněna o kontrolní výpočty použitých pohonů.

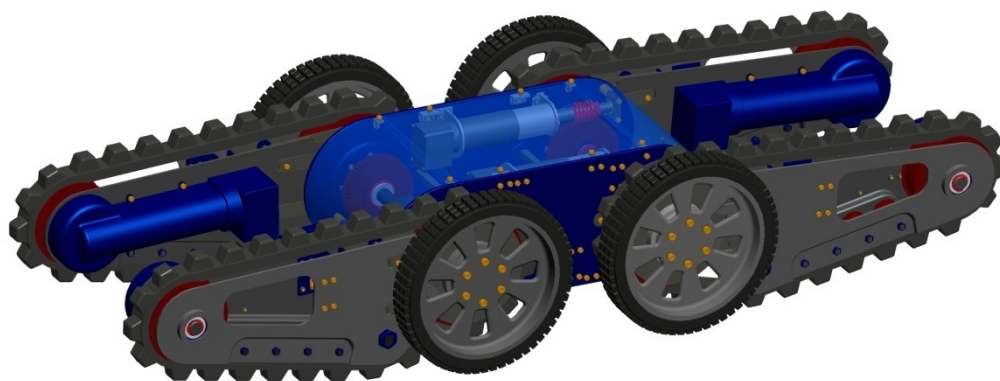
Hybridní podvozek je určen pro městské a civilní prostředí. Mezi místa jeho působení budou patřit především ulice, domy úřady, ale i prostředky městské hromadné dopravy jako jsou metro nebo tramvaje. S tím pak souvisí i určité typy překážek ke zdolávání jako jsou obrubníky, malé zídky, schody nebo také výtahy.

Hybridní podvozek kombinuje kolové a pásové lokomoční ústrojí. Kolové LÚ je určeno především k rychlému přemístění na místo zásahu a to z důvodu schopnosti dosáhnout velké rychlosti na nečlenitém terénu (chodníky, podlahy). Naopak členitý prostor a vyšší překážky jsou určeny pro pásové LÚ. Ke zdolávání těchto překážek je kromě pásů využito i výkyvných ramen. S jejich pomocí je podvozek schopen vytvářet nejrůznější polohy, díky čemuž se může daleko lépe přizpůsobovat okolnímu terénu či překážce.

Rychlost podvozku v pásovém číní 3,6 km/h. Tato hodnota je o něco málo než hodnota, která byla požadována a je třeba tento nedostatek řešit se zadavatelem. Rychlost podvozku v kolovém módu je 8,3 km/h, což je naopak vyšší hodnota než bylo požadováno.

Podvozek je možno osadit manipulační nástavbou či jinými potřebnými subsystemy (senzorický, vizuální). Jedinou podmínkou je, že nesmí být přesáhnutá povolená nosnost, která činí 19 kg.

Diplomovou práci by bylo vhodné doplnit o návrh řídicího systému, senzory, baterie a další elektronické komponenty. Dále by bylo vhodné lépe ošetřit krytování některých prostorů mimo rám podvozku.



9 Seznam použité literatury

- [1] SKAŘUPA, Jan. Kreativita a inovační myšlení v konstruování. 1. vydání. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. 230 s. ISBN 978-80-248-1717-0.
- [2] SKAŘUPA, Jan. *Metodika konstruování*. 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1993. 152 s. ISBN 80 - 7078 - 167 - X.
- [3] FERENCEY, Viktor; DROPPA, Peter. *Mechanika pohybu pásovej mobilnej techniky*. 1. vydání. Trenčín: Trenčianská univerzita Alexandra Dubčeka. 2005. 172 s. ISBN 80-8075-049-1
- [4] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. 4. doplněné vydání. Úvaly: ALBRA - pedagogické nakladatelství, 2008. 914 s. ISBN 978 - 80 - 7361 - 051 - 7.
- [5] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan; PROKEŠ, František. *Základy konstruování*. 3. přepracované vydání. Brno: Akademické nakladatelství Cerm®, s.r.o., 2005. 202 s. ISBN 80 - 7204 - 405 - 2.
- [6] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: části pohonů strojů*. 1. vydání. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 128 s. ISBN 978 - 80 - 248 - 1860-3.
- [7] SMRČEK, Juraj; KÁRNÍK, Ladislav. *Robotika - servisné roboty: navrhovanie - konštrukcia - riešenia*. Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška. 2008. 532 s. ISBN 978 - 80 - 7165 -713 - 2
- [8] KÁRNÍK, Ladislav. *Servisní roboty*. 1. vydání. VŠB - Technická univerzita Ostrava. 2004. 144 s. ISBN 80 - 248 -0626 - 6
- [9] *MOBIT, A Small Wheel -Track- Leg Mobile Robot* [online]. 2006 [citováno 10-5-2011] URL: <
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1713772>>
- [10] *TeleMAX* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: < http://www.telerob.de/hl_telemax.php#>

- [11] *Andros F6A* [online]. 2000 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://www.is.northropgrumman.com/by_solution/remote_platforms/product/f6a/f6a_accessories/index.html>
- [12] *MK3 Caliber Robot* [online]. 2009 [citováno 10-5-2011]
URL: <<http://www.icortechnology.com/mk3.html>>
- [13] *Malá robotizovaná jednotka pro průzkum* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://www.antiterrorism.eu/pyrotechnical_robot.php>
- [14] *VIPeR* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://www.galileomobility.com/?page_id=12>
- [15] *Cyclops Mk4D* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://www.abprecision.co.uk/EOD/EOD_cyclops.htm>
- [16] *Guardian* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://www.abprecision.co.uk/EOD/EOD_Guardian.htm>
- [17] *Robot NASA* [online]. 2010 [citováno 10-5-2011]
URL: <http://sina.sharif.edu/~cedra/rescue/en/current_project.htm>
- [18] *Ložiska* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011] URL: <<http://www.skf.cz>>
- [19] *Ložiskové domky* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011] URL: <<http://www.igus.cz>>
- [20] *Ozubené řemenice* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011] URL: <<http://www.tyma.cz>>
- [21] *Kuželová soukolí* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011] URL: <<http://www.matis.cz>>
- [22] *Šneková soukolí* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011]
URL: <<http://www.teatechnik.cz>>
- [23] *Motory a převodovky* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011]
URL: <<http://www.maxonmotor.com>>

[24] *Ložiska se zkříženými válečky* [online]. 2010 [citováno 19-5-2011]

URL: < <http://www.thk.com/cz/> >

10 Seznam příloh

Příloha 1. Katalogové listy

Příloha 2. Výkresová dokumentace - sestavný výkres

Příloha 3. DVD "Diplomová práce 2011"

- Sestavný výkres v AutoCadu
- Diplomová práce.pdf
- Modely 3 variant řešení v CAD systému Pro/Engineer 4.0
- Katalogové listy